



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/03.29.14.48-TDI

**SUSTENTABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS DA  
BACIA DO RIO GRANDE: UMA ABORDAGEM A  
PARTIR DO BARÔMETRO DA SUSTENTABILIDADE E  
A ENTROPIA**

Janaína Ferreira Guidolini

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Angélica Giarolla e Jean Pierre Henry Balbaud Ometto, aprovada em 12 de abril de 2019.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3T2T2JB>

INPE  
São José dos Campos  
2019

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

### **Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

### **Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/03.29.14.48-TDI

**SUSTENTABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS DA  
BACIA DO RIO GRANDE: UMA ABORDAGEM A  
PARTIR DO BARÔMETRO DA SUSTENTABILIDADE E  
A ENTROPIA**

Janaína Ferreira Guidolini

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Angélica Giarolla e Jean Pierre Henry Balbaud Ometto, aprovada em 12 de abril de 2019.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3T2T2JB>

INPE  
São José dos Campos  
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Guidolini, Janaína Ferreira.

G942s      Sustentabilidade dos recursos hídricos da bacia do Rio Grande: uma abordagem a partir do barômetro da sustentabilidade e a entropia / Janaína Ferreira Guidolini. – São José dos Campos : INPE, 2019.

xxii + 154 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/03.29.14.48-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientadores : Drs. Angélica Giarolla e Jean Pierre Henry Balbaud Ometto.

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Gestão integrada de recursos hídricos 3. Governança da água. 4. Entropia da informação. I.Título.

CDU 502.131.1:556.18

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): *Janaína Ferreira Guidolini*

Título: "SUSTENTABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO GRANDE: UMA ABORDAGEM A PARTIR DO BARÔMETRO DA SUSTENTABILIDADE E A ENTROPIA"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de *Doutor(a)* em  
*Ciência do Sistema Terrestre*

Dr. Peter Mann de Toledo



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dra. Angélica Giarolla



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Jean Pierre Henry Balbaud Ometto



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Gustavo Felipe Balué Arcoverde

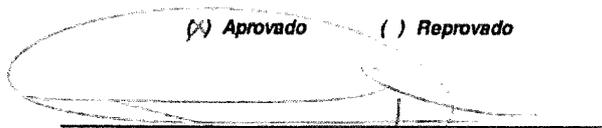


Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Carlos Alberto Valera



Convidado(a) / MPMG / Uberaba - MG

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

( ) unanimidade

São José dos Campos, 12 de abril de 2019

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de *Doutor(a)* em  
*Ciência do Sistema Terrestre***

**Dra. Vera Lúcia Abdala**



---

**Convidado(a) / IFTM / Uberaba - MG**

**( ) Participação por Video - Conferência**

**Aprovado      ( ) Reprovado**

**Este trabalho foi aprovado por:**

**( ) maioria simples**

**( ) unanimidade**

**São José dos Campos, 12 de abril de 2019**

## *A Floresta*

*A floresta é pura diversão  
Cheia de flores coloridas  
Cheia de animais bonitos  
Cheia de luzes e de vida.*

*A floresta é cheia de árvores e flores  
Cheia de vida e cores  
É uma tremenda diversão.*

*Como o homem está maltratando a natureza  
O mundo está uma grande tristeza,  
Mas se todos colaborarem  
A natureza vai se tornar  
Um infinito de grandeza.*

*(Escrito por Janaína Ferreira Guidolini, aos 10 anos de idade, em 1998)*

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.*

*Madre Teresa de Calcutá*



Aos meus pais, Abigail e Marcos, e  
a todos os anjos, professores, que passaram pela minha vida e me  
ensinaram a amar o aprender

DEDICO.



## AGRADECIMENTOS

Sou grata a Deus e ao Menino Jesus de Praga pela dádiva da vida e por estarem sempre ao meu lado.

A meus amados pais, Abigail e Marcos, por me escolherem como filha e por todo amor que me dedicam.

A meus irmãos, Dayse e Ricardo, que tanto demorei a conhecer.

Ao CNPq, por financiar o meu sonho de cursar o doutorado no INPE.

Aos meus orientadores, Dr. Jean e Dra. Angélica, por toda a paciência, incentivo, conversas e todo o tempo que dedicaram para me ajudar em tudo que precisei. A realização deste sonho, certamente, não aconteceria sem o apoio de vocês.

Às irmãs que a vida me permitiu ter: Jessyca (Kirídán), Letícia (Fiotinha), Patrícia (Paty) e Rebeca (Pimpolha). Obrigada por fazerem parte da minha vida! Vocês tornaram mais leve a árdua trajetória do doutorado.

Às amigas Talita e Carol, que tanto me alegraram pela amizade e por me darem sobrinhos de coração (Matias e Arthur).

Aos colegas do CCST: Rosa, Fabiana, Nathalia, Alexandre, Alber, Cássia (maninha), Anahi (melhor abraço de urso), Tainá, Camille, Gisleine, Dieguinho, Raquel Melo e tantos outros queridos. Vocês todos são muito especiais.

Às queridas Ângela e Mariana, por serem sempre tão solícitas. Ângela, você foi o primeiro anjo que tive no INPE.

Às queridas Alessandra e Franciele, sempre solícitas.

Ao Dr. Carlos Valera, por todas as boas sugestões para a tese.

Ao Gustavo, Evandro e Peter por toda a ajuda relacionada ao Barômetro da Sustentabilidade e à entropia da informação.

Aos mestres que tive ao longo da vida. Vocês foram fundamentais. Agradecimento especial à Vera, Teresa, Renato, Adelar, Othon Márcio e Douglas Tybel (criador da plataforma Monografis).

Aos amigos de longa data Gabriela (Macarrone), Genáina, Hygor, Lucas (Biscoito), Mauro, Narayana, Renata, Talita (Broa), Mariângela, Michelle. Amizade que independe de tempo e distância.

Ao meu companheiro de vida, Haron, por todo o carinho e paciência ao longo desta trajetória. Obrigada por tudo, inclusive pelos lindos gráficos que fez para a minha tese.

À Rachel pelo excelente trabalho de revisão/tradução do inglês.

À Erika pelas correções de ortografia e gramática da tese.

À coordenação do CCST, Dr. Kleber e Dr. Plínio.

Ao grupo de pesquisa POLUS (Política de Uso do Solo) da Universidade Estadual Paulista.

A todos os colaboradores do INPE e às meninas da ADC (Nair, Teresa e Josi).

À banca examinadora, por todas as contribuições para a melhoria da minha tese.

## RESUMO

A crise hídrica do século XXI é ocasionada pela má gestão, aumento da demanda e planejamento inadequado do uso e ocupação do solo. A água é um bem vital e fundamental para a manutenção da qualidade ambiental e o desenvolvimento socioeconômico de um país. Desta forma, por se tratar de um assunto muito complexo, as questões hídricas devem ser abordadas de forma sistêmica e integrada. Muitos pesquisadores reconhecem a sustentabilidade como a melhor abordagem para retratar problemas presentes e futuros relacionados à água. Em 2015, a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável criou uma agenda (Objetivos Globais ou Objetivos do Desenvolvimento Sustentável - ODS) com 17 objetivos e 169 metas globais para serem alcançadas até 2030. O ODS 6 visa assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos. Nesse contexto, os indicadores mostram-se como ferramentas robustas para analisar e monitorar a sustentabilidade do desenvolvimento, sendo fortemente recomendados por pesquisadores, gestores, instituições internacionais e formuladores de políticas públicas. Já os métodos de análise da sustentabilidade devem ser flexíveis e aplicáveis em diferentes escalas de trabalho, transparentes durante todo o processo de mensuração, e ainda possibilitar o monitoramento espaço-temporal. Diante disso, o objetivo principal desta pesquisa é analisar a condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG), Brasil. A análise da sustentabilidade apoiou-se na ferramenta Barômetro da Sustentabilidade e no método do peso entrópico. Os resultados mostraram condição inaceitável de sustentabilidade para a BHRG e elevado estresse ambiental para a manutenção do bem-estar humano. Trata-se de um desenvolvimento socioeconômico desagregado da conservação do ecossistema. Assim, esta pesquisa evidenciou a fragmentação das políticas públicas e a forte relação de dependência entre o homem e o ambiente.

**Palavras-chave:** Desenvolvimento Sustentável. Gestão Integrada de Recursos Hídricos. Governança da Água. Entropia da Informação.



# **WATER SUSTAINABILITY AT THE RIVER GRANDE BASIN: AN APPROACH BASED ON BAROMETER OF SUSTAINABILITY AND THE ENTROPY INFORMATION**

## **ABSTRACT**

The water crisis of the twenty-first century is caused by mismanagement, increased demand and inadequate planning of land use and occupation. The water is a vital and fundamental to the maintenance of environmental quality and socio-economic development of a country. Thus, because it is a very complex issue, the water issues must be addressed in a systematic and integrated manner. Many researchers recognize sustainability as the best approach to portray current and future issues related to water. In 2015, the United Nations Summit on Sustainable Development created an agenda (Global Goals and Sustainable Development Goals – SDG) with 17 goals and 169 global targets to be reached by 2030. The SDG 6, ensuring the availability and sustainable management of water and sanitation for all. In this context, indicators point to robust tools to analyze and monitor the sustainability of development and is strongly recommended by researchers, managers, international institutions and policy makers. Since the methods of analysis of sustainability must be flexible and applicable in different scales of work, transparent throughout the process of measurement and also enable the monitoring space-time. Thus, the main objective of this research is to analyze the condition of sustainability of water resources at the River Grande (BHRG), Brazil. The sustainability analysis relied on the Barometer of Sustainability tool and entropy weight method. The results showed unacceptable condition of sustainability for BHRG and high environmental stress for the maintenance of human well-being. This is a disaggregated socio-economic development of ecosystem conservation. Thus, this research highlighted the fragmentation of public policies and the strong relationship of dependence between man and the environment.

**Keywords:** Sustainable Development. Integrated Water Resources Management. Water Governance. Entropy Weight Method.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Grande.....	4
Figura 1.2 Bacia Hidrográfica do Rio Grande e respectivas unidades de gestão hídrica.....	5
Figura 1.3 Uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Grande .....	6
Figura 1.4 Classes de solo encontradas na Bacia Hidrográfica do Rio Grande .....	7
Figura 2.1 Classes hipsométricas da Bacia do Rio Grande .....	16
Figura 2.2 Classes de declividade para a Bacia do Rio Grande .....	17
Figura 2.3 Sub-bacias do Rio Grande .....	27
Figura 2.4 Distribuição das classes de uso do solo entre as sub-bacias do Rio Grande .....	30
Figura 2.5 Uso potencial do solo para as sub-bacias do Rio Grande.....	33
Figura 2.6 Autovalores da matriz de correlação. Variância acumulada do CP1 e CP2 .....	45
Figura 2.7 Análise de Componentes Principais (ACP) (CP1 X CP2) .....	47
Figura 2.8 Análise de agrupamento (Single Linkage) entre as unidades de gestão hídrica.....	49
Figura 2.9 Análise de agrupamento (Single Linkage) entre as variáveis.....	50
Figura 3.1 Delineamento da Pesquisa .....	62
Figura 3.2 Organização dos indicadores por tema, dimensão e subsistema.	63
Figura 3.3 Gráfico bidimensional representando a condição de sustentabili- dade dos recursos hídricos da BHRG para o Estado de Minas Gerais.....	68
Figura 3.4 Gráfico bidimensional representando a condição de sustentabili- dade dos recursos hídricos da BHRG, para o Estado de São Paulo .....	69
Figura 3.5 Environmental Stress Index e Well-being Stress Index para a BHRG.....	71

Figura 3.6 Hierarquia das áreas temáticas prioritárias, separadas por dimensão e por Estado..	74
Figura 3.7 Valores dos temas na escala do BS para os estados de Minas Gerais e São Paulo	75
Figura 3.8 Cenário simulado para a BHRG com a dimensão econômica inalterada.....	76
Figura 3.9 Delineamento para o cálculo do peso entrópico e do CSSi	85
Figura 3.10 Delineamento para o cálculo do peso entrópico	98
Figura 3.11 Organização dos indicadores, temas e dimensões	100
Figura 3.12 Gráficos bidimensionais representando a condição de sustentabilidade dos municípios da GD1 (Alto Rio Grande) e GD8 (Baixo Rio Grande), para o período de 2010-2015.	108

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 Características geométricas da Bacia do Rio Grande .....	13
Tabela 2.2 Características de relevo da Bacia do Rio Grande.....	15
Tabela 2.3 Características de drenagem da Bacia do Rio Grande .....	18
Tabela 2.4 Ponderação do RN e uso atual do solo, segundo Valle Junior (2008).....	29
Tabela 2.5 Critérios para a determinação do conflito ambiental.....	29
Tabela 2.6 Características morfométricas das sub-bacias do Rio Grande.....	31
Tabela 2.7 Limiares para as classes de RN para as sub-bacias do Rio Grande .....	32
Tabela 2.8 Proporção dos tipos de solo nas sub-bacias do Rio Grande.....	34
Tabela 2.9 Conflitos de uso do solo em função do uso atual x uso potencial .	35
Tabela 2.10 Identificação dos conflitos ambientais nas sub-bacias do Rio Grande .....	36
Tabela 2.11 Descrição dos Indicadores .....	46
Tabela 2.12 Autovetores da matriz de correlação .....	48
Tabela 3.1 Critérios de avaliação dos indicadores .....	85
Tabela 3.2 Peso entrópico dos indicadores, separados por dimensão do desenvolvimento sustentável .....	87
Tabela 3.3 Índice de Condição de Sustentabilidade do Saneamento (CSSi) para GD1 e GD8 .....	88
Tabela 3.4 Peso entrópico dos Indicadores por Dimensão de Desen- volvimento Sustentável .....	103
Tabela 3.5 Peso entrópico das dimensões de desenvolvimento sustentável para 2010-2015.....	104



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1	INTRODUÇÃO ..... 1
1.1	Objetivos ..... 3
1.1.1	Objetivo geral ..... 3
1.1.2	Objetivos específicos ..... 3
1.2	Área de estudo ..... 4
2	DIAGNÓSTICO FÍSICO-CONSERVACIONISTA E ANÁLISE EXPLORATÓRIA PARA CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO GRANDE..... 9
2.1	Caracterização morfométrica da Bacia do Rio Grande ..... 10
2.1.1	Introdução ..... 10
2.1.2	Material e métodos ..... 11
2.1.2.1	Processamento dos dados ..... 11
2.1.2.2	Variáveis morfométricas ..... 12
2.1.3	Resultados e discussão ..... 12
2.1.3.1	Variáveis geométricas ..... 13
2.1.3.2	Variáveis de relevo ..... 15
2.1.3.3	Variáveis de drenagem ..... 18
2.1.3.4	Características morfométricas X uso e ocupação do solo ..... 21
2.1.4	Conclusão ..... 23
2.2	Potencial de uso do solo e identificação de áreas de conflitos ambientais ..... 24
2.2.1	Introdução ..... 24
2.2.2	Material e métodos ..... 26
2.2.2.1	Processamento dos dados ..... 26
2.2.2.2	Caracterização morfométrica ..... 27
2.2.2.3	Identificação das áreas de conflito ambiental ..... 29
2.2.2.4	Resultados e discussão ..... 30
2.2.2.5	Conclusão ..... 39

2.3	Análise exploratória de indicadores do diagnóstico de situação dos recursos hídricos da BHRG: caracterização geral das UGHs	40
2.3.1	Introdução	40
2.3.2	Material e métodos	42
2.3.2.1	Análise exploratória dos dados	42
2.3.2.2	Política de recursos hídricos na BHRG	43
2.3.2.3	Resultados e discussão	44
2.3.2.4	Conclusão	55
3	AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE SUSTENTABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRANDE EM DIFERENTES ESCALAS	57
3.1	Sustentabilidade dos recursos hídricos da Bacia do Rio Grande, Brasil: uma abordagem baseada no barômetro da sustentabilidade	57
3.1.1	Introdução	57
3.1.2	Material e métodos	62
3.1.2.1	Seleção e organização dos indicadores	62
3.1.2.2	Elaboração da escala de desempenho dos indicadores selecionados	63
3.1.2.3	Atribuição de valores aos indicadores na escala do BS	65
3.1.2.4	Resultados e discussão	67
3.1.2.4.1	Condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da BHRG	67
3.1.2.4.2	Relação entre o bem-estar humano e o ambiente	70
3.1.2.4.3	Áreas prioritárias na BHRG	72
3.1.2.5	Conclusão	79
3.2	Aplicação da informação entrópica para avaliar a condição de sustentabilidade do saneamento ambiental: um estudo de caso para a Bacia do Rio Grande, Brasil	80
3.2.1	Introdução	80
3.2.2	Material e métodos	83
3.2.2.1	Seleção dos indicadores de sustentabilidade	84

3.2.2.2	Método do peso entrópico para a avaliação da condição de sustentabilidade do setor de saneamento .....	84
3.2.3	Resultados .....	85
3.2.3.1	Ponderação dos indicadores .....	86
3.2.3.2	Ponderação dos subsistemas .....	87
3.2.3.3	Índice de Condição de Sustentabilidade do Saneamento (CSSi) para o GD1 e GD8, durante o período de análise .....	88
3.2.3.4	Discussão .....	89
3.2.3.5	Conclusão .....	93
3.3	Sustentabilidade dos recursos hídricos em escala municipal: uma abordagem baseada no barômetro de sustentabilidade e entropia da informação .....	95
3.3.1	Introdução .....	95
3.3.2	Material e métodos .....	97
3.3.2.1	Seleção do sistema de indicadores para a análise da sustentabilidade .....	98
3.3.2.2	Método do peso entrópico para a ponderação dos indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável .....	98
3.3.2.3	Barômetro da sustentabilidade .....	99
3.3.2.4	Elaboração da escala de desempenho dos indicadores .....	99
3.3.2.5	Atribuição de valores aos indicadores na escala do BS .....	101
3.3.3	Resultados e discussão .....	102
3.3.3.1	Aplicação do método do peso entrópico para os indicadores de sustentabilidade selecionados .....	102
3.3.3.2	Situação do desenvolvimento sob a abordagem do BS .....	106
3.3.4	Conclusão .....	112
4	DISCUSSÃO GERAL .....	115
4.1	Abordagem “barômetro de sustentabilidade mais entropia da Informação” e pesquisas futuras .....	119
4.2	Recomendações .....	120
5	CONCLUSÃO .....	122
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	123

APÊNDICE A – DIAGNÓSTICO FÍSICO-CONSERVACIONISTA E CONDIÇÃO DE SUSTENTABILIDADE DA BACIA DO RIO GRANDE.....	137
---	-----

## 1 INTRODUÇÃO

A crise hídrica do século XXI relaciona-se mais à gestão do que a uma crise real de escassez e estresse. Ou ainda, é resultado de problemas ambientais acentuados por problemas socioeconômicos (GLEICK, 2000; ROGERS et al., 2006). Para outros atores, a crise hídrica é decorrente de problemas reais de disponibilidade e aumento da demanda, setorialização da gestão e ausência de abordagem preditiva e sistêmica para tratar as questões da água (SOMLYODY; VARIS, 2006). Tundisi (2008) evidencia a necessidade de abordar as questões hídricas de forma sistêmica, integrada e holística com a descentralização para as bacias hidrográficas.

Segundo Veiga (2010) o desenvolvimento sustentável consiste no que nós deixaremos para as futuras gerações; o que deixarmos deverá ser suficiente para que as gerações futuras desfrutem de oportunidades ao menos equivalentes às que tivemos. A sustentabilidade é uma abordagem holística que visa ao equilíbrio entre três pilares principais: economia, sociedade e meio ambiente. Pesquisadores e formuladores de políticas públicas defendem essa abordagem para resolver assuntos relacionados à água (GUIDOLINI et al., 2018). Em outras palavras, a sustentabilidade busca o equilíbrio entre os subsistemas bem-estar humano e bem-estar ambiental. Ademais, instiga a compreender a relação entre o homem e o ambiente em que vive, sob o preceito de que não são interdependentes (PRESCOTT-ALLEN, 1997).

Mensurar a sustentabilidade é tão complexo quanto o seu conceito. Entretanto, os indicadores apresentam-se como ferramentas robustas para avaliar o progresso rumo ao desenvolvimento sustentável. Pesquisadores, gestores e instituições internacionais recomendam o uso de indicadores (PIRES et al., 2017). Apesar disso, é importante ressaltar que há limitações em trabalhos com indicadores. Entre as principais, destacam-se a frequência na coleta e disponibilização dos dados, escala de trabalho e existência de séries temporais.

Os métodos de mensuração da sustentabilidade devem ser flexíveis e aplicáveis em diferentes escalas de trabalho, transparentes durante todo o

processo de mensuração, e ainda possibilitar o monitoramento espaço-temporal (GRAYMORE; SIPE; RICKSON, 2008).

A questão hídrica é fundamental para o desenvolvimento social e econômico de um país. Por isso, estudos de sustentabilidade hídrica são considerados urgentes (SUN et al., 2018), inclusive, é um dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS6 – Objetivo que visa assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos, até 2030) [grifo da autora]. Assim, a relevância e a urgência da temática motivaram esta pesquisa.

Diante disso, o principal objetivo desta tese foi analisar a condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG), Brasil. A hipótese da pesquisa é que a manutenção do bem-estar humano implica elevado estresse ambiental, ou seja, a condição de sustentabilidade da água é inaceitável. A mensuração da sustentabilidade apoiou-se na ferramenta Barômetro da Sustentabilidade (BS) e entropia da informação. Diferentes escalas de trabalho foram abordadas nesta tese: bacia hidrográfica, unidades administrativas ou unidades de gestão hídrica (UGHs) e municípios.

A tese foi estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução, objetivos da pesquisa e caracterização geral da Bacia do Rio Grande.

Capítulo 2: Compreende a caracterização morfométrica, a determinação do potencial de uso do solo, a identificação das áreas de conflito ambiental e a análise exploratória dos dados do diagnóstico de situação dos recursos hídricos da BHRG. Os resultados deste capítulo mostram o comportamento da água em relação às características geométricas, de relevo e de drenagem. Ao fim da morfometria, a discussão é integrada ao contexto de uso e ocupação da bacia. O uso potencial do solo e conflitos ambientais, determinados a partir do método do Coeficiente de Rugosidade (RN), evidencia o uso correto/potencial do solo e mostra as áreas conflitantes. Já a análise exploratória, que se consistiu em análise de componentes principais (ACP) e análise de cluster ou agrupamento, identificou as similaridades e antagonismos entre as unidades de

gestão hídrica da BHRG e entre os estados de Minas Gerais e São Paulo. Os resultados deste capítulo implicam maior conhecimento sobre o comportamento hidrológico na bacia, fornecendo *insights* para promover o planejamento sustentável do uso do solo e as variáveis (ambientais, econômicas e sociais) mais representativas para a área de estudo.

Capítulo 3: Este capítulo apresenta a análise da condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da BHRG em diferentes escalas. Para isso, foram usados o BS, a entropia da informação e o BS mais entropia da informação. Além disso, este capítulo traz reflexões sobre a relação de dependência entre o homem e a natureza e evidencia a urgente necessidade de integração das políticas públicas e sensibilização de atores (cientistas, sociedade, gestores, etc.).

Capítulo 4: Este capítulo apresenta a discussão geral da tese, incluindo os principais resultados encontrados e resposta à hipótese. Ademais, discute-se mais sobre a abordagem BS mais entropia da informação, vantagens e limitações dessa abordagem, pesquisas futuras e recomendações.

Capítulo 6: Apresenta as principais conclusões da tese.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Analisar a condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG).

### **1.1.2 Objetivos específicos**

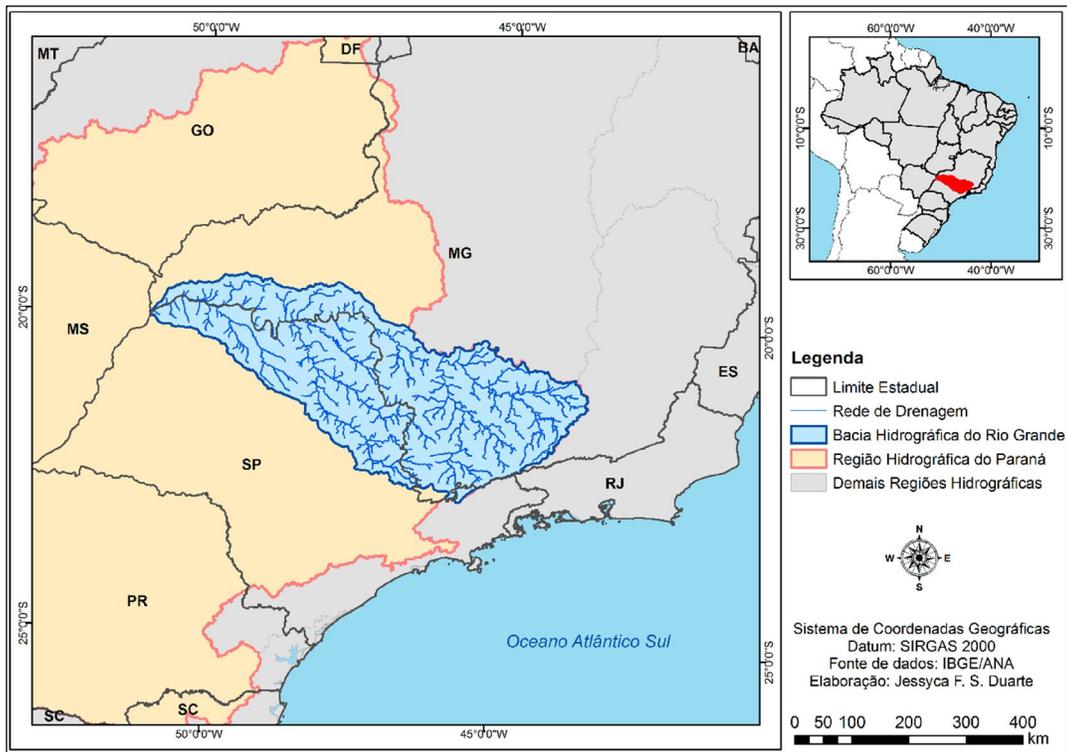
- 1) Caracterizar a Bacia do Rio Grande a partir do diagnóstico físico-conservacionista e análise exploratória de dados do diagnóstico de situação dos recursos hídricos.
- 2) Analisar a condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da BHRG, a partir do BS.

- 3) Analisar a condição de sustentabilidade do setor de saneamento para a BHRG, a partir da entropia da informação.
- 4) Analisar a condição de sustentabilidade dos municípios do Alto Rio Grande (GD1) e Baixo Rio Grande (GD8), usando BS e entropia da informação.

## 1.2 Área de estudo

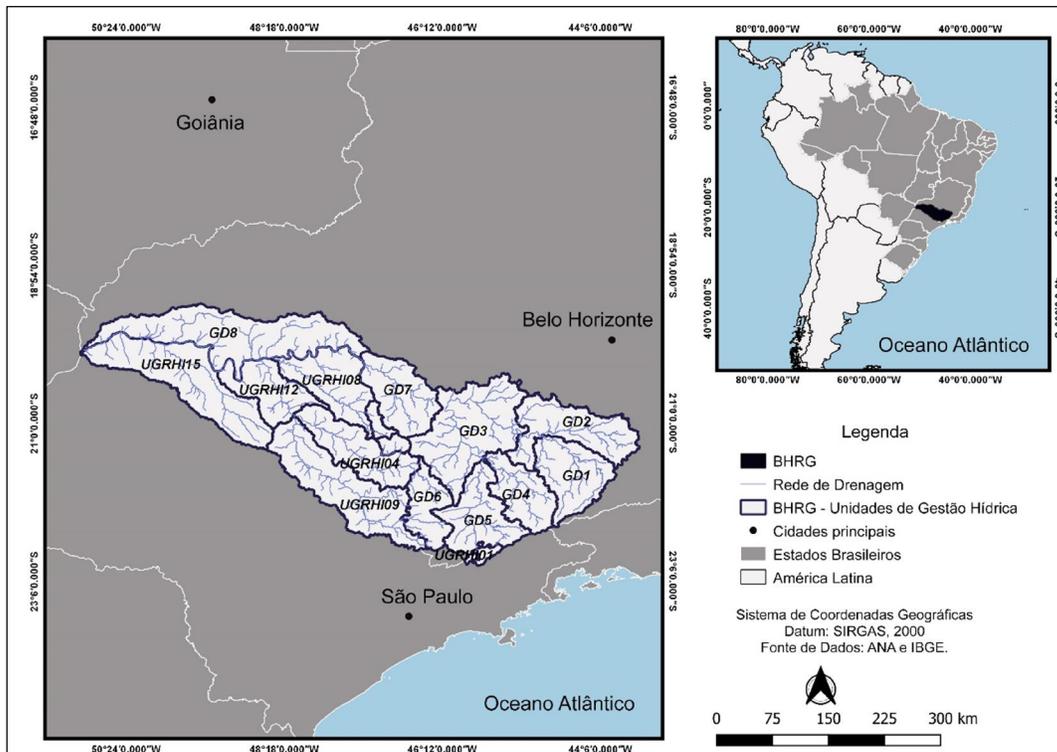
A BHRG está inserida na Região Hidrográfica do Paraná e localiza-se na região sudeste do Brasil. A área de contribuição é de 144.689,54 km<sup>2</sup> divididos entre os Estados de Minas Gerais (MG), 60% da área total da bacia, e São Paulo (SP), 40% da área total da bacia (Figura 1.1). A bacia contempla 393 municípios, total ou parcialmente inseridos nela, abrigando uma população de 8,6 milhões de pessoas, o que corresponde a 4,5 % da população brasileira em 2010 (ANA, 2017).

Figura 1.1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Grande.



A BHRG está dividida em 14 unidades de gestão hídrica (UGHs), sendo que 8 unidades estão inseridas no Estado de Minas Gerais (GDs) e 6 unidades estão inseridas no Estado de São Paulo (UGRHs) (Figura 1.2).

Figura 1.2 – Bacia Hidrográfica do Rio Grande e respectivas unidades de gestão hídrica.

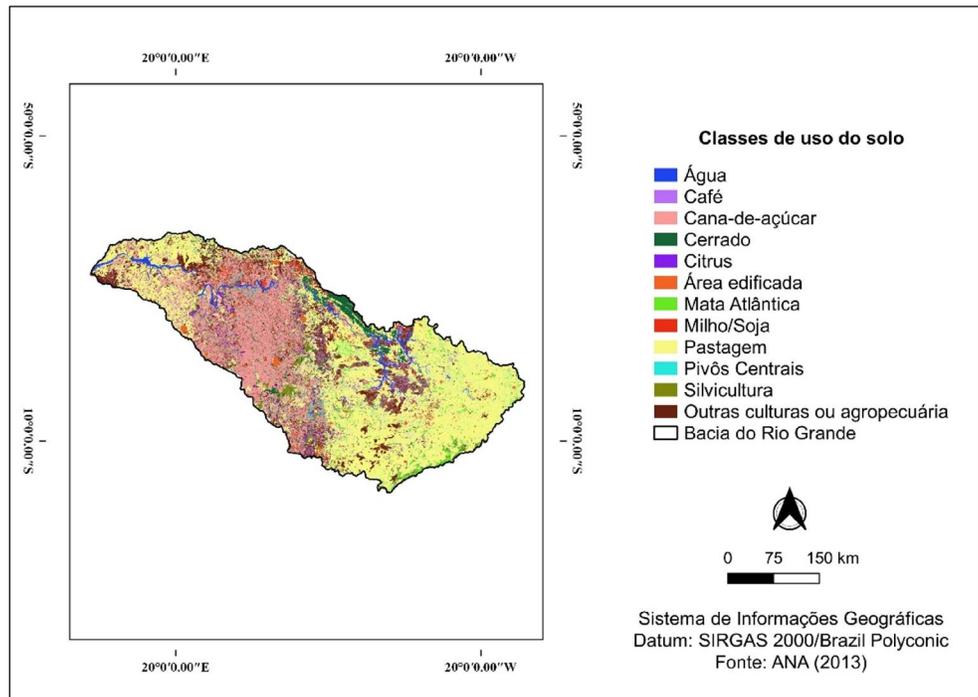


Em termos geoeconômicos, a BHRG está situada em uma importante região polarizada pela confluência dos eixos entre Brasília, Rio de Janeiro, Goiânia, Belo Horizonte e São Paulo, onde se concentram os maiores fluxos econômicos do País. Segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), a região da BHRG é responsável por um dos maiores Produtos Internos Brutos (PIBs) do País (189,5 bilhões de reais em 2011, representando 4,6 % do PIB nacional).

Quanto ao uso e ocupação do solo (Figura 1.3), destacam-se as atividades agropecuárias (83% da BHRG), industrial, além do setor de serviços nos centros urbanos e geração de energia hidrelétrica. Entre as atividades

agropecuárias evidencia-se o cultivo de cana-de-açúcar (19,2% da área total) e a pastagem (40,8% da área total) (ANA, 2013).

Figura 1.3 – Uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Grande.



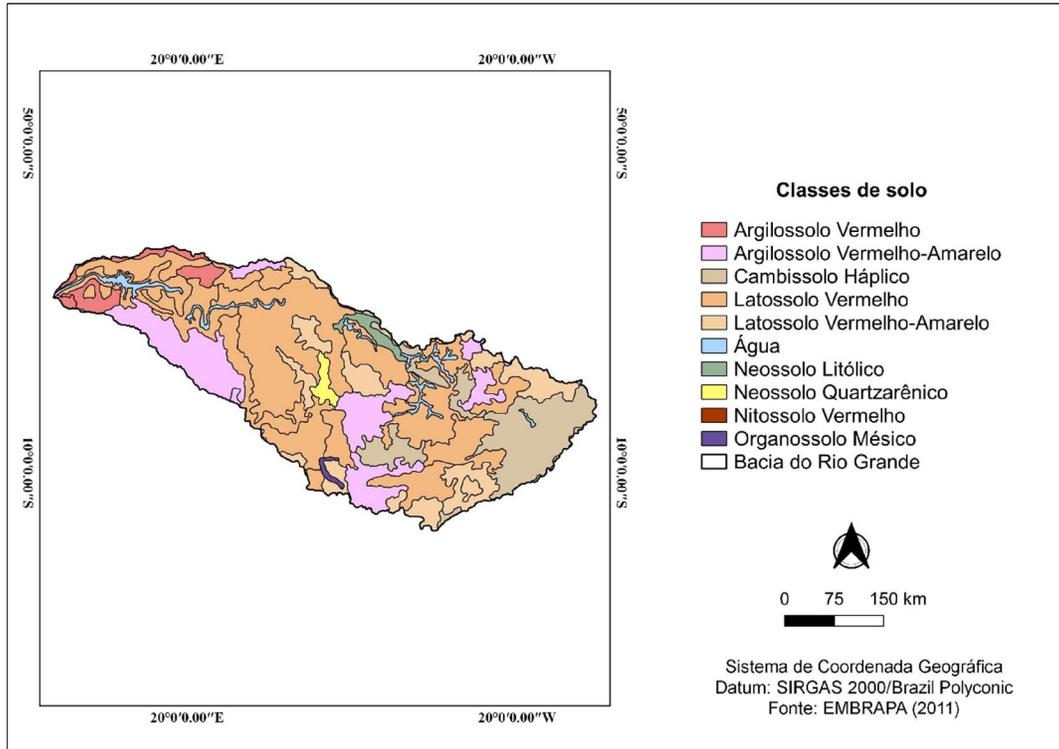
Fonte: Adaptado de ANA (2017).

A precipitação anual tem uma amplitude de 632 mm, com precipitação média de 1423 mm, máxima de 1924 mm e mínima de 1292 mm. Vale destacar que a região é caracterizada por um período chuvoso de seis a sete meses (de outubro a março/abril), com 80% das chuvas concentradas no verão. O clima é caracterizado por verões chuvosos e invernos secos (ANA, 2016).

Os latossolos, argissolos e cambissolos são os principais tipos de solo da região. Os latossolos são solos minerais, não hidromórficos, profundos, porosos e com baixa fertilidade. Os argissolos são solos medianamente profundos, moderadamente bem drenados, com evolução avançada, menor permeabilidade e horizonte superficial arenoso. Entretanto, tendem a apresentar maior concentração de nutrientes, por serem eutróficos na região da BHRG. Os cambissolos são altamente drenados, pouco evoluídos e de baixa

profundidade, constituídos de material mineral e têm baixa fertilidade (ANA, 2016) (Figura 1.4).

Figura 1.4 – Classes de solo encontradas na Bacia Hidrográfica do Rio Grande.



Apresentando áreas cobertas por formações vegetais dos biomas Mata Atlântica e Cerrado, a BHRG tem biodiversidade rica e diversificada. A presença de veredas, muito características da região, consiste em formações típicas de chapadões, com composição florística herbácea e arbustiva e presença de gramíneas entre manchas de mata nativa e cerrado (ANA, 2016).

Quanto à macrocompartimentação geológica da Bacia do Rio Grande, observa-se que a parte oeste da bacia está sobre rochas sedimentares da Província Paraná, com menos de 400 milhões de anos. Nesta área, destacam-se os relevos mais planos e menores altitudes, com cotas que variam de 270m a 700m em relação ao nível do mar. Já a parte leste da Bacia do Rio Grande é constituída por rochas metamórficas e ígneas das Províncias Tocantins e São Francisco, com mais de 500 milhões de anos. Nesta região, os relevos

fortemente ondulados, montanhosos e escarpados se sobressaem, com cotas que variam de 800m a maiores que 2000m (ANA, 2016).

É importante ressaltar que os principais conflitos de uso da água na BHRG, relacionam-se à deficiência do saneamento ambiental (esgotamento sanitário e resíduos sólidos), à poluição difusa devido às atividades agropecuárias e à erosão do solo (GUIDOLINI et al., 2018a).

## **2 DIAGNÓSTICO FÍSICO-CONSERVACIONISTA E ANÁLISE EXPLORATÓRIA PARA CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO GRANDE**

O Capítulo 2 apresenta o diagnóstico físico-conservacionista e análise exploratória dos indicadores do diagnóstico de situação dos recursos hídricos para a caracterização da Bacia do Rio Grande. Assim, o capítulo foi dividido em três subcapítulos, em formato de artigos científicos, para facilitar a compreensão: (1) Caracterização Morfométrica da Bacia do Rio Grande, (2) Potencial de Uso do Solo e Identificação de Áreas de Conflitos Ambientais e (3) Análise Exploratória de Indicadores do Diagnóstico de Situação dos Recursos Hídricos da BHRG.

No contexto da sustentabilidade dos recursos hídricos, conhecer bem uma bacia hidrográfica é o primeiro passo para a gestão sustentável da água. A caracterização morfométrica, apresentando o comportamento hidrológico na bacia, é importante porque os processos hidrológicos controlam a distribuição espaço-temporal da água e influem sobre o desenvolvimento socioeconômico regional. Já o estudo do potencial de uso do solo e identificação de áreas conflitantes direciona os tomadores de decisão ao planejamento adequado do uso e ocupação do solo, considerando a capacidade de suporte deste. Assim, é possível amenizar os problemas de conflito de uso da água, especialmente a erosão do solo e poluição difusa, devido às atividades agropecuárias (principais conflitos de uso da água na Bacia do Rio Grande). Por fim, a análise exploratória de dados do diagnóstico de situação dos recursos hídricos permite evidenciar as variáveis mais representativas para a gestão sustentável da água na bacia.

## **2.1 Caracterização morfométrica da Bacia do Rio Grande**

### **2.1.1 Introdução**

A caracterização morfométrica é o resultado da medição e análise matemática da configuração da superfície terrestre, forma e dimensão do relevo e aspectos que interferem no ciclo hidrológico (AMERI; POURGHASEMI; CERDA, 2018; RAHAMAN; ARUCHAMYC; JEGANKUMARD, 2015). A bacia hidrográfica, unidade de planejamento territorial brasileira, é o melhor elemento para avaliar o ciclo hidrológico, especialmente na fase terrestre (KABUTE; GESSESSE., 2018). Dessa forma, a análise de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas tem grande importância na avaliação do potencial hídrico regional, já que tem abordagem quantitativa e auxilia no estudo e compreensão sobre a capacidade de escoamento superficial (SANTOS et al., 2012).

Variáveis morfométricas de bacias hidrográficas têm sido extensivamente estudadas desde a década de 1940 por Horton (1945), Miller (1953), Schumm (1956), Strahler (1964), Vilela e Matos (1975) e outros. Recentemente, a morfometria de bacias tem sido utilizada em avaliações de recursos naturais e riscos ambientais, especialmente grandes inundações, estudo e avaliação do potencial hídrico subterrâneo e comportamento hidrológico. (AMERI; POURGHASEMI; CERDA, 2018). Na ausência de dados hidrológicos observados, a morfometria pode fornecer informações oportunas sobre as características hidrológicas e informações fisiográficas e geológicas de uma bacia hidrográfica.

É conhecido que as características morfométricas trazem informações importantes sobre a relação solo-superfície. A densidade de drenagem, amplitude altimétrica, índice de circularidade, coeficiente de compacidade, fator forma, densidade hidrográfica, declividade média, hierarquização da rede de drenagem, entre outros, são variáveis extraídas por bacias hidrográficas que se relacionam com vulnerabilidade ambiental (ROCHA e KURTZ, 2001). Além disso, ampliam a compreensão sobre a vulnerabilidade natural dos terrenos às ações antropogênicas, processos erosivos, zoneamento territorial e dinâmica superficial da água (OLIVEIRA et al., 2013; PISSARRA et al., 2004; RIBEIRO;

SALOMÃO, 2003). Apesar disso, as variáveis morfométricas são pouco exploradas em Planos Integrados de Recursos Hídricos (PIRH) de bacias hidrográficas brasileiras. Previstos pela Política Nacional de Recursos Hídricos, os PIRHs são documentos que definem a agenda dos recursos hídricos de uma região, incluindo informações sobre ações de gestão, projetos, obras e investimentos prioritários (ANA, 2017). Os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica controlam fortemente a distribuição espaço-temporal de recursos hídricos (águas superficiais e subterrâneas) e, conseqüentemente, o potencial regional de desenvolvimento socioeconômico (KABITE; GESSESSE, 2018).

Diante do exposto, nós consideramos que as características físicas de uma bacia revelam informações fundamentais para o planejamento do território e para o manejo e conservação da água e do solo. Desta forma, o objetivo desta pesquisa é fazer a caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Grande, Brasil. Este estudo fornece *insights* para ampliar a compreensão sobre o comportamento hidrológico e poderá subsidiar futuros diagnósticos de situação dos recursos hídricos, PIRHs, estudos de fragilidade ambiental e uso potencial do solo.

## **2.1.2 Material e métodos**

### **2.1.2.1 Processamento dos dados**

O processamento dos dados ocorreu a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE). Para isso, utilizaram-se cenas Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) TOPODATA (INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil) de 30 metros de resolução, disponíveis no site<sup>1</sup>. Originalmente, esse MDE possui sistema de coordenadas geográficas e Datum WGS84 (EPSG: 4326). Desta forma, houve conversão do sistema de projeção para UTM (Universal

---

<sup>1</sup> TOPODATA: Bacos de Dados Geomorfométricos do Brasil: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>

Transversa de Mercator), sistema de coordenadas cartesianas, e Datum SIRGAS 2000 (Brazil Polyconic/EPSSG: 5880).

A extração da rede de drenagem e sua hierarquização e os mapas de hipsometria e declividade foram gerados a partir do MDE e processados pelo Quantum Gis 2.18.20 a partir dos algoritmos r. watershed, strahler order, e r. slope. Os algoritmos encontram-se na ferramenta processing, inseridos no Sistema de Suporte de Análise de Recursos Geográficos (GRASS-GIS) do Quantum Gis 2.18.20. O limite da área de contribuição da Bacia do Grande foi obtido no site da Agência Nacional de Águas (ANA) e está disponível no site<sup>2</sup>.

A utilização de Sistema de Informação Geográfica (SIG) para estudar as características morfométricas de uma bacia hidrográfica é ideal porque facilita a visualização dos dados, o processamento e a quantificação dos atributos topográficos (ALTAF; MERAJ; ROMSHOO, 2013; KABITE; GESSESSE, 2018).

### **2.1.2.2 Variáveis morfométricas**

As variáveis morfométricas calculadas neste estudo foram divididas em três grupos: características geométricas, características de relevo e características de drenagem. As siglas, unidades de medida, fórmula e referência considerada para cada variável estão dispostas na Tabela A1.

### **2.1.3 Resultados e discussão**

Para estudarmos as características físicas da BHRG, nós calculamos variáveis relacionadas à geometria, ao relevo e à drenagem. Primeiramente, as variáveis morfométricas foram analisadas separadamente, por tópico. Ao final, apresentamos uma análise integrada e as possíveis implicações para a bacia. Com isso, mostramos que a geometria da bacia pode facilitar o escoamento superficial. Entretanto, sem planejamento adequado do uso e ocupação do

---

<sup>2</sup> Metadados da Agência Nacional de Águas (ANA)  
<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>

solo, algumas características de relevo e drenagem podem possibilitar episódios de inundação e perda de solo por erosão.

### 2.1.3.1 Variáveis geométricas

As características geométricas de uma bacia hidrográfica revelam o comportamento da água em relação ao armazenamento e escoamento superficial. (CAMPANHARO, 2012). A Bacia do Rio Grande apresenta área de contribuição (A) de 144.689,54km<sup>2</sup>, perímetro (P) de 2.217,96km e comprimento axial (Lax) de 780,68km. A Tabela 2.1 apresenta os resultados das características geométricas da BHRG.

Tabela 2.1 – Características geométricas da Bacia do Rio Grande.

	Características Geométricas
Kc – Coeficiente de Compacidade	1,66
F – Fator Forma	0,24
Ic – Índice de Circularidade	0,37

O coeficiente de compacidade (Kc) consiste na relação entre o perímetro da bacia hidrográfica e a circunferência de um círculo hipotético cuja área seja igual à área de drenagem da bacia em questão (VILELA; MATOS, 1975). Silva e Melo (2006) classificaram as bacias hidrográficas em função do Kc da seguinte maneira:  $1,00 \leq Kc < 1,25$  (bacia com alta propensão a grandes enchentes);  $1,25 \leq Kc < 1,50$  (bacia com tendência mediana a grandes enchentes) e  $Kc \geq 1,50$  (bacia não sujeita a grandes enchentes). O alto valor de Kc para a Bacia do Rio Grande (1,66) indica que a BHRG não está sujeita a inundações em situações normais de precipitação.

O fator forma (F) representa a relação entre a área de drenagem e o comprimento axial da bacia. Mede-se o F da foz ao ponto mais distante da bacia. Silva e Melo (2006) classificaram as bacias hidrográficas em função do F da seguinte maneira:  $F \geq 0,75$  (bacia sujeita a enchentes);  $0,50 \leq F < 0,75$  (bacia com tendência mediana a enchente) e  $F \leq 0,50$  (bacia não sujeita à

enchente). O baixo valor de F para a Bacia do Rio Grande (0,24) caracteriza a bacia como estreita, longa e não sujeita a enchentes sob condições normais de precipitação. Dessa forma, a possibilidade de ocorrer chuvas intensas, cobrindo toda a extensão da bacia simultaneamente, é baixa. O contrário ocorre em bacias circulares, onde a concentração do deflúvio ocorre em um único ponto (CAMPANHARO, 2012).

O índice de circularidade ( $I_c$ ) representa a relação entre a área da bacia e a área de um círculo de perímetro igual ao da bacia hidrográfica estudada. Quanto mais próximo de 1 for o valor de  $I_c$ , mais próxima da forma circular será a bacia (MILLER, 1953). O  $I_c$  especifica também o estágio de maturidade topográfica de uma bacia hidrográfica. O valor de  $I_c$  para a Bacia do Rio Grande é de 0,37, o que a caracteriza como uma bacia alongada em estágio inicial de maturidade topográfica. A relação representada pelo  $I_c$  constitui-se da extensão e frequência dos fluxos, estruturas geológicas, uso da terra, cobertura do solo, clima, relevo e declividade da bacia (JOHN WILSON et al., 2012).

Em resumo, os resultados das variáveis geométricas se apresentaram condizentes e indicaram bacia hidrográfica estreita e alongada, com baixa propensão a inundações sob condições normais de precipitação.

Muitos estudos de caracterização morfométrica de bacias hidrográficas investigam o  $K_c$ , F e  $I_c$  porque essas variáveis estão relacionadas ao tempo de concentração da água, que se dá a partir do início de uma precipitação. Em outras palavras, as variáveis geométricas permitem compreender sobre o tempo que a água leva para alcançar a foz, dentro de sua área de contribuição (VILELA; MATOS, 1975; SANTOS et al 2012; LORENZON et al., 2015; KABITE; GESSESSE, 2018). Nas bacias alongadas, os afluentes atingem o curso d'água principal em vários pontos ao longo dele, diferentemente das bacias circulares, nas quais a concentração do deflúvio se dá em um só ponto, diminuindo o tempo de concentração e aumentando as chances de ocorrência de enchentes (LORENZON et al., 2015).

### 2.1.3.2 Variáveis de relevo

As características do relevo descrevem diferentes composições da paisagem, em que ocorrem os processos erosivos (fluxo de material em superfície), infiltração, lixiviação e translocação (fluxo de material em profundidade) (CAMPANHARO, 2012). A Tabela 2.2 mostra os resultados obtidos para as variáveis de relevo.

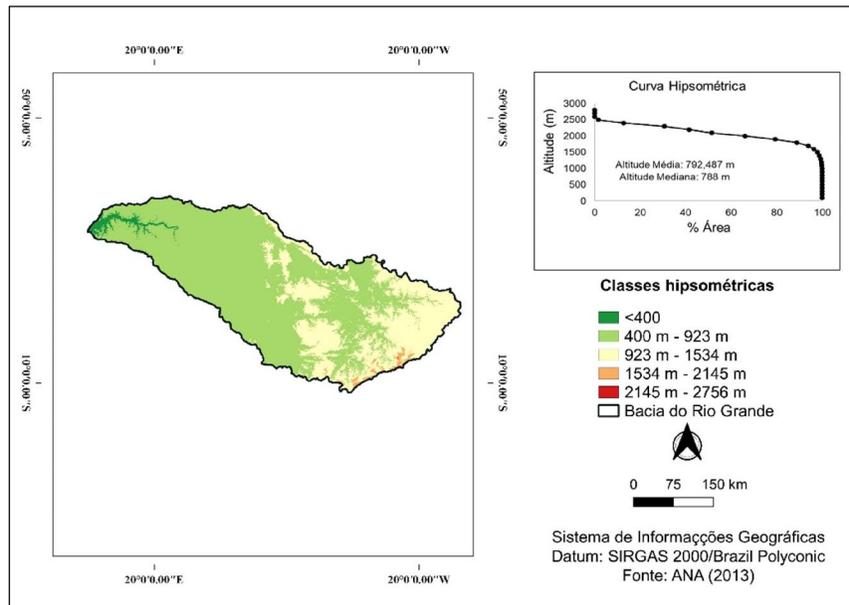
A altitude interfere na quantidade de radiação, evapotranspiração, temperatura e precipitação de uma bacia hidrográfica (CASTRO; LOPES, 2001). A variação de altitude é um fator importante porque a temperatura e precipitação relacionam-se a ela. Variações de temperatura influenciam os processos de evaporação e transpiração. Já as variações na precipitação atuarão diretamente no escoamento superficial e infiltração (VILLELA; MATTOS, 1975; SANTOS et al., 2012).

Tabela 2.2 – Características de relevo da Bacia do Rio Grande.

	Características de Relevo
Hmax – Altitude Máxima	2756
Hmed – Altitude Média	792,49
Hmin – Altitude Mínima	312
$\Delta m$ – Amplitude Altimétrica	2444
Dm - Declividade Média	11,03
Rr – Razão de Relvo	0,00
CR – Comprimento de Rampa	2,99

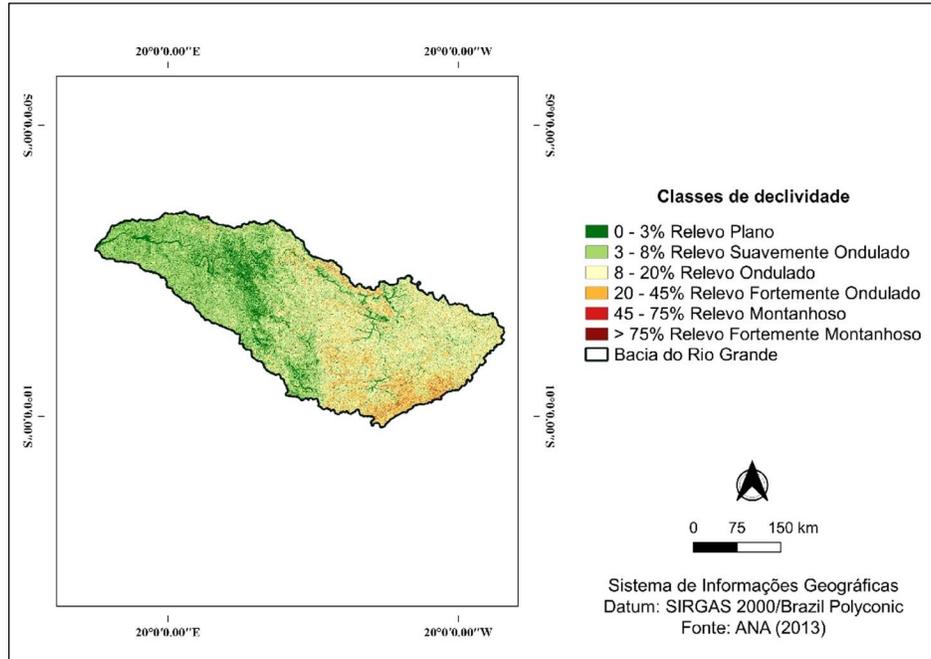
Na Bacia do Rio Grande, a altitude mínima (Hmin), altitude máxima (Hmax) e altitude média (Hmed) é de 312m, 2756m e 792,49m, respectivamente. A amplitude altimétrica ( $\Delta m$ ) é de 2444m. A alta amplitude altimétrica tende a favorecer o escoamento superficial (SANTOS et al., 2012). As classes hipsométricas para a BHRG são apresentadas na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Classes hipsométricas da Bacia do Rio Grande.



A Bacia do Rio Grande apresenta declividade média ( $D_m$ ) de 11,02% (Figura 2.2). Conforme a classificação da EMBRAPA (1979), a BHRG tem relevo ondulado. Este parâmetro, associado à cobertura vegetal, tipo e uso do solo, é importante porque regula a velocidade do escoamento superficial e influencia os processos erosivos (ROCHA; KURTZ, 2001). Portanto, influi no tempo gasto pela água da chuva para concentrar-se nos leitos fluviais que constituem a rede de drenagem da bacia (VILELA; MATOS, 1975).

Figura 2.2 – Classes de declividade para a Bacia do Rio Grande.



A razão de relevo (Rr) relaciona-se com as variações topográficas da bacia hidrográfica. Trata-se da relação entre a amplitude altimétrica ( $\Delta m$ ) e o comprimento axial da bacia ( $L_{ax}$ ) (POLITANO; PISSARRA, 2003; SANTOS et al., 2012). Desta forma, o Rr mede a declividade geral de uma bacia de drenagem e é um indicador da intensidade de erosão operando nas vertentes da bacia (STRAHLER, 1964). Rossi e Pfeifer (1999) classificaram o Rr da seguinte maneira: Rr baixa – valores de 0,00 a 0,10; Rr média – valores de 0,11 a 0,30 e Rr alta – valores de 0,31 a 0,60. A Bacia do Rio Grande tem baixa razão de relevo ( $Rr = 0,00 \text{ m.m}^{-1}$ ). Baixos valores de Rr ocorrem, principalmente, devido às rochas basais resistentes da bacia aliadas ao baixo grau de inclinação (RAI et al., 2017).

O comprimento médio do escoamento superficial (CR) interfere na perda de solo porque rampas extensas podem gerar escoamento superficial com alta velocidade. Este índice apresenta-se como a distância média em que a água da chuva teria que escoar sobre uma bacia hidrográfica, caso o escoamento fosse retilíneo (VILELA; MATTOS, 1975). A Bacia do Rio Grande apresenta CR igual a  $2,99 \text{ km.km}^{-2}$ .

Em resumo, as características do relevo da BHRG, assim como a sua geometria, podem facilitar o escoamento superficial. Entretanto, a declividade média “ondulada” aliada ao extenso CR pode aumentar a velocidade do escoamento superficial em alguns pontos que, a depender de outros fatores, pode ocasionar perdas de solo por erosão hídrica.

### 2.1.3.3 Variáveis de drenagem

As características do padrão de drenagem influenciam o comportamento hidrológico e litológico da bacia hidrográfica (CAMPANHARO, 2012). A Tabela 2.3 mostra os resultados obtidos para as variáveis de drenagem para a BHRG.

Tabela 2.3 – Características de drenagem da Bacia do Rio Grande.

	Características da drenagem
LCP – Comprimento do Rio Principal	794,28
CT – Comprimento Total dos Cursos d'Água	12062,57
Ctalv – Comprimento do Talvegue	437,85
Dd – Densidade de Drenagem	0,09
Cm – Coeficiente de Manutenção	11,99
Gc – Gradiente de Canais	3,47
Is – Índice de Sinuosidade	44,87
Nu1 – Número de Canais de 1ª ordem	250
Dh – Densidade Hidrográfica	0,06
Ord – Ordem Hierárquica de Strahler	5

Para a Bacia do Rio Grande, os valores de comprimento do rio principal (LCP), comprimento total dos cursos d'água (CT) e comprimento do talvegue (Ctalv) foram: 979,34km; 12.062,57km e 431,30km, respectivamente.

Segmentação e ordenação hierárquica de fluxos são fundamentais para explicar o caráter hidrodinâmico de uma bacia hidrográfica. A hierarquização da rede de drenagem reflete o grau de ramificação ou bifurcação de uma bacia hidrográfica. A rede de drenagem da Bacia do Rio Grande é classificada como ordem cinco, ou seja, é bem ramificada (STRAHLER, 1964).

Com padrão de drenagem dendrítico (Christofoletti, 1980), a BHRG tem 327 cursos d'água (Nu), sendo 250 cursos d'água de primeira ordem (Nu1). A

densidade hidrográfica (Dh) da Bacia do Rio Grande corresponde a 0,07 cursos d'água/km<sup>2</sup>, ou seja, a quantidade de cursos d'água existente a cada 1 km<sup>2</sup> da bacia é menor que 1. Baixos valores de Dh implicam capacidade reduzida de gerar novos trechos de drenagem (Christofolletti, 1974) e indicam a ocorrência de material subsuperficial permeável e relevo pouco acidentado. Conhecer a densidade hidrográfica é importante para fundamentar o desenvolvimento de processos erosivos (SINGH, 1980). A rede de drenagem de uma bacia pode ser alterada, bastando uma pequena alteração de gradiente de descarga do rio motivada por ajustes neotectônicos ou a elevação súbita da descarga da bacia, em função das enxurradas associadas ao desmatamento em grande escala, a montante. Motivações como estas podem levar à erosão basal das margens côncavas, até a formação de barras de sedimentos, nas margens convexas, a jusante (SANTOS et al., 2012).

A densidade de drenagem (Dd) representa o grau de dissecação topográfica em paisagens elaboradas pela atuação fluvial ou expressa a quantidade disponível de canais para o escoamento e controle exercido pelas estruturas geológicas (CHRISTOFOLETTI, 1980; SANTOS et al., 2012). Christofolletti (1980) classificou as bacias hidrográficas, segundo a densidade de drenagem, da seguinte forma: baixa densidade –  $Dd \leq 5 \text{ km.km}^{-2}$ ; média densidade –  $5 < Dd < 13 \text{ km.km}^{-2}$  e alta densidade –  $Dd \geq 13 \text{ km.km}^{-2}$ . A Bacia do Rio Grande tem baixa densidade de drenagem, ou seja, é mal drenada com  $0,09 \text{ km.km}^{-2}$ . Valores baixos de densidade de drenagem estão geralmente associados a regiões de rochas permeáveis e de regime pluviométrico caracterizado por chuvas de baixa intensidade (LIMA, 2008). Teodoro et al. (2007) explicam o que acontece na BHRG quando afirmam que bacias com baixa densidade de drenagem apresentam relevo pouco declivoso, com rampas longas e solos profundos com alta capacidade de infiltração. A exceção acontece em áreas próximas a foz, onde o relevo apresenta vertentes curtas e declivosas. Para um mesmo tipo de clima, a densidade de drenagem depende do comportamento hidrológico no solo. Assim, em solos mais impermeáveis, as condições para ocorrer escoamento superficial são melhores, possibilitando a formação de

canais e, conseqüentemente, aumentando a densidade de drenagem. O contrário acontece em solos permeáveis (HORTON, 1945).

A sinuosidade do curso d'água (SIN) é um fator controlador da velocidade do escoamento superficial. Quanto maior for a sinuosidade dos trechos de drenagem, mais difícil será o percurso da água até a foz, devido à redução da velocidade do escoamento (Rocha e Kurtz, 2001), facilitando a ocorrência de erosão (SANTOS et al., 2012). Christofolletti (1980) estabeleceu cinco classes de sinuosidade do curso d'água. São elas:  $Is < 20\%$  (canal muito reto);  $20\% \leq Is \leq 30\%$  (canal reto);  $30\% \leq Is \leq 40\%$  (canal divagante);  $40\% \leq Is \leq 50\%$  (canal sinuoso) e  $Is \geq 50\%$  (canal muito sinuoso). A Bacia do Rio Grande tem cursos d'água sinuosos, com valor de  $Is$  de 44,87%.

O coeficiente de manutenção ( $C_m$ ) representa a relação inversa da densidade de drenagem ( $D_d$ ) e fornece a área mínima necessária para a manutenção de um quilômetro linear de canal de escoamento (SCHUMM, 1956). Assim, a Bacia do Rio Grande necessita de 11,99 km<sup>2</sup> para manter perene cada quilômetro linear de canal de escoamento.

Por fim, o gradiente de canais ( $G_c$ ) é dado pela relação entre a altitude máxima da bacia hidrográfica e o comprimento do canal principal. Este índice tem a finalidade de indicar a declividade dos cursos d'água da bacia (HORTON, 1945; SANTOS et al., 2012). A Bacia do Rio Grande tem valor de  $G_c$  igual a 2,81 m.km<sup>-1</sup>. "O gradiente de canal influencia os processos de aporte/deposição de sedimentos e a natureza dos sedimentos (seixos, areia, silte e argila) transportados ou depositados. Por outro lado, os cursos d'água com gradiente de canal elevado e fluxo em leito rochoso propiciam a oxigenação das águas, beneficiando os cursos d'água dos quais são contribuintes (cascadeamento). O gradiente de canal é alterado no trajeto dos cursos d'água, em função de descontinuidade geológica e morfológica do leito. Nos trechos onde o gradiente de canal é menor, as calhas são profundas. Já em trechos de maiores gradientes, apresentam-se corredeiras em leitos rochosos e rasos, ocasionando a turbulência do fluxo. Estas alterações

refletem em alternância de processos de transporte e deposição de sedimentos” (EMATER, 2014, p. 09).

Em resumo, as variáveis de drenagem caracterizam a BHRG como mal drenada e com canais sinuosos. Enquanto a baixa densidade de drenagem facilita a infiltração da água devido à alta permeabilidade do solo (maior parte da bacia), a alta sinuosidade dos canais reduz a velocidade do escoamento. Além disso, a BHRG necessita de área mínima considerável para gerar, desenvolver e manter os trechos de drenagem, tornando-os perenes ( $C_m = 12,99\text{km}^2$ ).

#### **2.1.3.4 Características morfométricas X uso e ocupação do solo**

Curvello, Batista e Targa (2008) fizeram um estudo sobre os impactos da ocupação humana na microbacia do rio Batedor, localizado no município de Cruzeiro, Estado de São Paulo – Brasil. Os autores concluíram que a microbacia apresentava características físicas favoráveis ao abastecimento hídrico porque é bem drenada, com grande disponibilidade hídrica, não apresenta risco de enchentes e está situada em área de muitas nascentes, na encosta da Serra da Mantiqueira. Além disso, possui cursos d’água jovens, com pouca sinuosidade. Ao comparar a conclusão dos autores com os resultados obtidos para a BHRG, sinais de alerta proeminentes são apresentados.

A BHRG é de grande relevância socioeconômica para o Brasil e quase 400 municípios usufruem dos serviços ecossistêmicos prestados. Apesar da bacia não apresentar riscos a inundações e possuir características de relevo que facilitam o escoamento superficial e a infiltração da água, ela é mal drenada, tem cursos d’água sinuosos e tem baixa capacidade de gerar e manter trechos de drenagem. Isso, aliado ao uso e à ocupação do solo, pode prejudicar a prestação de serviços ecossistêmicos (inclusive o abastecimento público) e causar picos de cheia.

Dados da Secretaria Nacional de Defesa Civil (Sedec/MI) apontam que ocorreram 124 decretos de Situação de Emergência (SE) ou de Estado de

Calamidade Pública (ECP) por inundações expedidos pelos municípios da BHRG entre os anos de 2003 e 2012, o que representou 38,3% dos registros da Região Hidrográfica do Paraná (ANA, 2016). O uso e a ocupação do solo mal planejados podem alterar a velocidade de escoamento dos fluxos e influenciar a produção de sedimentos e resíduos, comprometendo a qualidade da água e prejudicando a saúde da população (ANA, 2017).

Existem 8635 feições erosivas cadastradas na BHRG (ANA, 2017). "A erosão é resultado do desgaste progressivo do solo pela ação da água e do vento, provocando o desprendimento e a movimentação de partículas do solo. As diferentes formas de manejo, uso e ocupação do solo podem acelerar ou atenuar significativamente este processo. Além de causar perdas socioeconômicas diretas, como perda da camada agricultável do solo e danos à infraestrutura, a erosão tem como subproduto o assoreamento de cursos d'água e reservatórios. Isso prejudica o uso sustentável dos recursos hídricos tanto em termos quantitativos quanto em termos qualitativos" (ANA, 2016).

Considerando a intensa atividade agropecuária, que corresponde a mais de 80% da área total da BHRG, deve-se proteger o solo para evitar perdas por erosão e controlar o escoamento superficial. A proteção e recuperação de solos podem ser alcançadas a partir da implementação de técnicas conservacionistas conjuntas, como: 1) Utilização de plantas de cobertura e cobertura morta; 2) Rotação de culturas; 3) Terraceamento; 4) Manutenção da fertilidade do solo, etc. (VALERA et al., 2017). Vale ressaltar a importância da preservação da vegetação nativa e respeito às Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reserva Legal (RL). Estudo recente para a BHRG identificou a recuperação da vegetação nativa como um passo fundamental para alcançar condição sustentável do recurso hídrico regional (GUIDOLINI et al., 2018b). Apenas 12,8% da vegetação nativa é preservada na BHRG (ANA, 2017). Portanto, é necessário fiscalizar rigorosamente o cumprimento das leis ambientais.

Diante do exposto, é possível inferir que o uso e a ocupação do solo influenciam o comportamento da água em uma bacia hidrográfica. Apesar das

variáveis morfométricas indicarem baixa propensão a inundações, sob condições normais de precipitação, o planejamento territorial inadequado pode implicar picos de cheia e perdas de solo por erosão.

Este estudo resultou em maior compreensão sobre o comportamento hidrológico e poderá subsidiar futuros diagnósticos de situação dos recursos hídricos, PIRHs, estudos de fragilidade ambiental e uso potencial do solo.

#### **2.1.4 Conclusão**

A Bacia do Rio Grande tem forma estreita e alongada. Em condições normais de precipitação, a BHRG é pouco susceptível a inundações. Com padrão de drenagem dendrítico, a Bacia do Rio Grande é de quinta ordem e tem alta permeabilidade e baixas densidades hidrográficas e de drenagem.

A alta amplitude altimétrica, aliada ao elevado comprimento médio de escoamento superficial e relevo ondulado, facilita o escoamento superficial. Entretanto, a alta sinuosidade dos cursos d'água reduz a velocidade do escoamento. Isso pode ocasionar a ocorrência de inundações e perdas de solo por erosão.

O uso e a ocupação do solo influem sobre o comportamento hidrológico em uma bacia hidrográfica. Considerando a intensa atividade agropecuária na BHRG, o emprego de técnicas de conservação do solo e proteção/recuperação da vegetação nativa são fundamentais para controlar o escoamento superficial e evitar perdas por erosão.

É importante ressaltar que a caracterização morfométrica de bacias hidrográficas deve ser integrada. Isoladamente, as variáveis não caracterizam a área de estudo.

Esta pesquisa amplia a compreensão sobre o comportamento hidrológico e poderá subsidiar futuros diagnósticos de situação dos recursos hídricos, PIRHs, estudos de fragilidade ambiental e uso potencial do solo.

## **2.2 Potencial de uso do solo e identificação de áreas de conflitos ambientais**

### **2.2.1 Introdução**

O uso mal planejado do solo é o grande acelerador dos processos erosivos e uma das principais causas de degradação ambiental (VALLE JUNIOR et al., 2013). Os impactos do mau planejamento influem na qualidade física e fertilidade dos solos, produtividade agropecuária, qualidade e disponibilidade hídrica, biodiversidade e outros serviços ecossistêmicos prestados (VALERA et al., 2016). O planejamento inadequado e o mau uso do solo causam perdas anuais na produtividade, alcançando aproximadamente 7 milhões de hectares de áreas agrícolas em várias regiões do planeta. Em termos financeiros, essas perdas representam US\$ 70 por habitante, segundo estimativas da FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação) (COSTA et al., 2019).

Em algumas áreas, o uso atual da terra não é condizente com o uso potencial. Quando isso acontece, dizemos que a área está em conflito ambiental ou conflito de uso do solo. O conceito de conflito ambiental abrange duas situações específicas: (1) o uso do solo está acima da sua capacidade de suporte ou (2) o solo está sendo subestimado, o que ocasiona baixa produtividade (PISSARRA et al., 2018; SIQUEIRA et al., 2012a; VALLE JUNIOR et al., 2013). O mau uso do solo é o precursor de conflitos ambientais. Por isso, conhecer o potencial de uso da terra é fundamental para planejar e otimizar o seu uso junto à implementação de técnicas conjuntas de conservação do solo (OLIVEIRA et al., 2013).

A unidade de trabalho ideal para estudos de uso potencial do solo é a bacia hidrográfica porque nela é possível associar os processos naturais às ações antrópicas (LIMA, 2008; OLIVEIRA et al., 2013). A fim de otimizar o planejamento de uso da terra, foram desenvolvidos vários métodos de determinação do potencial de uso (FEICK; HALL, 2002; KOONTZ, 2005; ZHANG; LI; FUNG, 2012), que evoluíram com o surgimento dos sistemas de informação geográfica (SIG). Apesar disso, nenhum desses modelos foram

arquitetados para determinar o uso da terra em função da sua capacidade de suporte (COSTA et al., 2019). Uma exceção foi o modelo de Rocha e Kurtz (2001), baseado no Coeficiente de Rugosidade (RN). O RN foi introduzido por Strahler (1952) como variável relacionada à densidade de encosta e de drenagem em bacias hidrográficas. O modelo de determinação do potencial de uso do solo baseado no RN estabelece uma relação entre a capacidade de suporte do solo, a densidade de drenagem (Dd) e a declividade média (Dm). Além de fornecer uma avaliação direta do potencial de uso do solo, o modelo RN articula-se efetivamente com a teoria do conflito, proposta por Valle Junior (2008). Essa teoria avalia os impactos ambientais gerados pelo uso inadequado do solo. Entretanto, o modelo baseado no RN pode ter a eficácia reduzida em função do tamanho da área de contribuição da bacia. Devido à heterogeneidade, a Dm e Dd podem ser insuficientes para determinar o uso potencial do solo em grandes bacias hidrográficas (COSTA et al., 2019). Em casos como esse, a compartimentação da bacia é recomendável.

Muitos estudos têm demonstrado a eficiência do método RN para a determinação do potencial de uso do solo em bacias hidrográficas brasileiras (COSTA et al., 2019; SILVA et al., 2003; SIQUEIRA et al., 2012b; VALLE JUNIOR et al., 2011,2012; OLIVEIRA et al., 2013). O método do RN é simples de ser executado e pode ser feito em SIGs. Entretanto, é recorrente a ausência de avaliações do uso potencial do solo ou de aptidão de terras agrícolas em planos de gestão territorial e planos integrados de recursos hídricos (PIRHs). A situação é crítica porque esses planos incluem informações sobre ações de gestão, projetos, obras e investimentos prioritários, que desconsideram a capacidade de suporte do solo.

Diante disso, o objetivo deste estudo é avaliar o potencial de uso do solo e identificar conflitos ambientais nas sub-bacias do Rio Grande, a partir do método do RN (ROCHA; KURTZ, 2001; VALLE JUNIOR et al., 2014) junto à teoria de conflito de Valle Junior (2008). A metodologia pode ser facilmente replicada a outras bacias hidrográficas do Brasil. Os resultados apresentados nesta pesquisa poderão subsidiar o planejamento territorial e a elaboração dos planos integrados de recursos hídricos na BHRG.

## 2.2.2 Material e métodos

### 2.2.2.1 Processamento dos dados

O processamento dos dados ocorreu a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE). Para isso, utilizaram-se cenas *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) TOPODATA (INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil) de 30 metros de resolução, disponíveis no site<sup>3</sup>.

Originalmente, esse MDE possui sistema de coordenadas geográficas e *Datum* WGS84 (EPSG: 4326). Desta forma, houve conversão do sistema de projeção para UTM (Universal Transversa de Mercator), sistema de coordenadas cartesianas, e *Datum* SIRGAS 2000 (*Brazil Polyconic*/EPSG: 5880).

A extração da rede de drenagem e sua hierarquização foram realizadas a partir do MDE e processadas pelo Quantum Gis 2.18.20 a partir dos algoritmos *r. watershed* e *strahler order*. Os algoritmos encontram-se na ferramenta *processing*, inseridos no Sistema de Suporte de Análise de Recursos Geográficos (GRASS-GIS) do Quantum Gis 2.18.20.

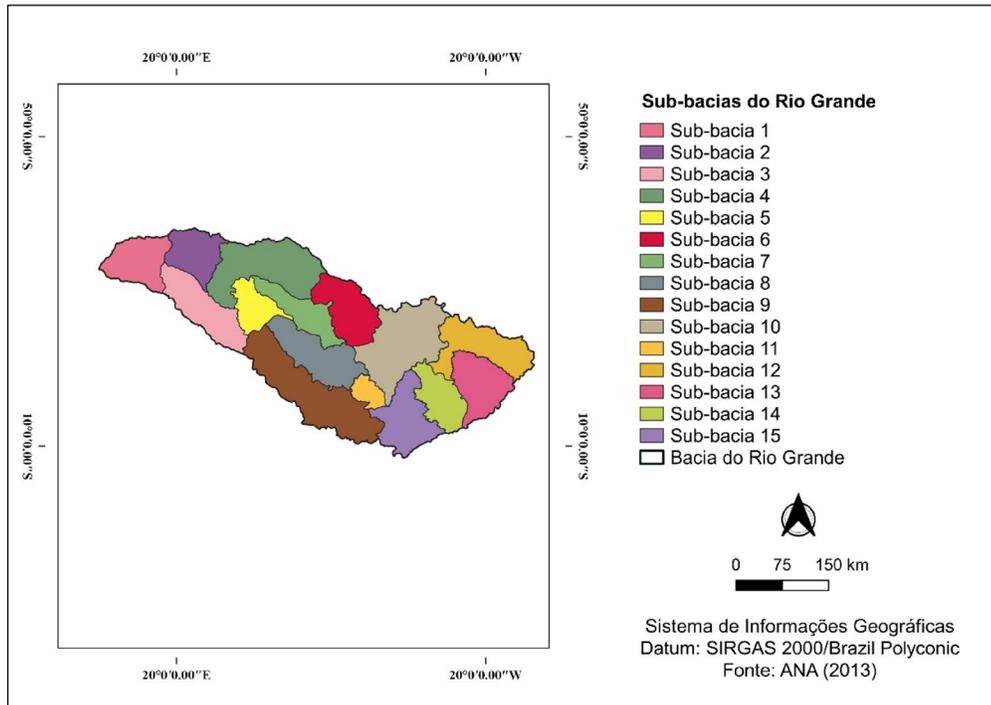
Utilizou-se a base hidrográfica de sub-bacias nível 2 elaborada para o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e disponibilizada no site da ANA (Agência Nacional de Águas)<sup>4</sup>. A BHRG apresenta-se compartimentada em 15 sub-bacias (Figura 2.3).

---

<sup>3</sup> TOPODATA: Banco de Dados Geométricos do Brasil: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>

<sup>4</sup> Metadados da Agência Nacional de Águas:  
<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>

Figura 2.3 – Sub-bacias do Rio Grande.



### 2.2.2.2 Caracterização morfométrica

Entre as variáveis morfométricas, calculou-se a Densidade de Drenagem (Dd), a Declividade Média (Dm) e, por fim, o Coeficiente de Rugosidade (RN), conforme as equações a seguir:

$$Dd = \frac{\sum CT}{A} \quad (2.1)$$

$$Dm = 100 \times \left( \sum LCN \times \frac{\Delta h}{A} \right) \quad (2.2)$$

$$RN = Dd \times Dm \quad (2.3)$$

Em que:

Dd = Densidade de drenagem, km.km<sup>-2</sup>.

$\sum CT$  = Comprimento total dos cursos d'água, km.

A = Área de contribuição da sub-bacia, km<sup>2</sup>.

Dm = Declividade média, em %.

$\Delta h$  = Equidistância entre as curvas de nível, km.

$\sum LCN$  = Comprimento total das curvas de nível, km.

RN = Coeficiente de rugosidade (adimensional).

A Dm, associada à cobertura vegetal, tipo e uso do solo, regula a velocidade do escoamento superficial e influi sobre os processos erosivos (ROCHA e KURTZ, 2001). A Embrapa (1979) classificou a declividade da seguinte forma: 0-3% (relevo plano); 3-8% (relevo suavemente ondulado); 8-20% (relevo ondulado); 20-45% (relevo fortemente ondulado); 45-75% (relevo montanhoso); > 75% (relevo fortemente montanhoso). Já a densidade de drenagem (Dd) representa o grau de dissecação topográfica em paisagens elaboradas pela atuação fluvial ou expressa a quantidade disponível de canais para o escoamento e controle exercido pelas estruturas geológicas (CHRISTOFOLETTI, 1980; SANTOS et al., 2012). Christofolletti (1980) classificou as bacias hidrográficas, segundo a densidade de drenagem, da seguinte forma: baixa densidade –  $Dd \leq 5 \text{ km.km}^{-2}$ ; média densidade –  $5 < Dd < 13 \text{ km.km}^{-2}$  e alta densidade –  $Dd \geq 13 \text{ km.km}^{-2}$ .

O coeficiente de rugosidade (RN) é um parâmetro ambiental que direciona o uso potencial do solo quanto à sua capacidade de suporte. A partir do RN, o uso potencial do solo pode ser classificado como: (A) agricultura, (B) pastagem, (C) reflorestamento ou (D) preservação. Para a discriminação das classes, o RN foi calculado para as 15 sub-bacias do Rio Grande. Após a ordenação dos RNs (do menor para o maior), foram calculados a amplitude (Amp), diferença entre o maior valor de RN e o menor valor de RN, e o intervalo de classes (I), resultado da divisão amplitude/4 (referente às quatro classes de potencial de uso). Como o RN influi nos processos de erosão hídrica, associou-se o menor valor de RN às terras com potencial agrícola (classe A) e o maior valor de RN às terras apropriadas para preservação (classe D) (VALLE JUNIOR, 2008).

### 2.2.2.3 Identificação das áreas de conflito ambiental

Para a determinação das áreas de conflito ambiental, as classes de RN e as classes de uso do solo foram ponderadas. A ponderação do RN e o uso atual do solo são apresentados na Tabela 2.4. Em relação às classes de uso do solo (Figura 2.4), foram consideradas Classe A: café, cana-de-açúcar, citrus, milho/soja, pivôs centrais e outras culturas ou agropecuária. O Cerrado e a Mata Atlântica formaram a Classe D. Pastagem e silvicultura constituíram as classes B e C, respectivamente.

Tabela 2.4 - Ponderação do RN e uso atual do solo.

RN – Uso Atual do Solo	Peso
Agricultura (Classe A)	1
Pastagem (Classe B)	2
Reflorestamento (Classe C)	3
Preservação (Classe D)	4

Fonte: Valle Junior (2008).

Baseados na metodologia proposta de Valle Junior (2008), os critérios para a determinação dos conflitos são mostrados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Critérios para a determinação do conflito ambiental.

Classes de Conflito Ambiental	RN – Uso Atual
Classe 1	(Preservação) 4 – 3 (Reflorestamento) (Reflorestamento) 3 – 2 (Pastagem) (Pastagem) 2 – 1 (Agricultura)
Classe 2	(Preservação) 4 – 2 (Pastagem) (Reflorestamento) 3 – 1(Agricultura)
Classe 3	(Preservação) 4 – 1 (Agricultura)

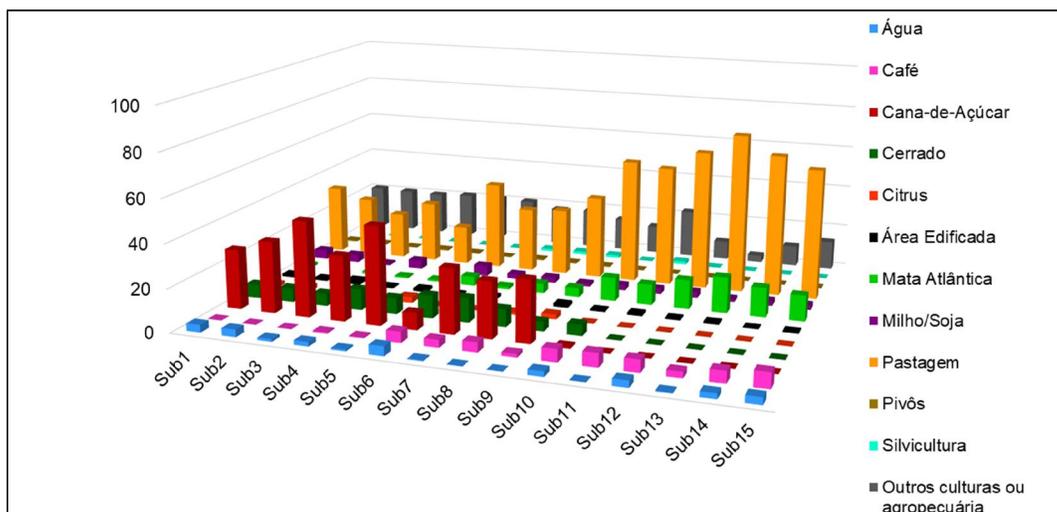
Fonte: Adaptado de Valle Junior (2008).

#### 2.2.2.4 Resultados e discussão

Para determinar o potencial de uso do solo, calculou-se o Coeficiente de Rugosidade (RN) a partir das características morfométricas das sub-bacias. Nós observamos que 73,3% das sub-bacias têm potencial de uso agrícola, 13,3% das sub-bacias têm potencial de uso para pastagem e 12,4% das sub-bacias têm potencial de uso para reflorestamento ou preservação. O solo tem sido usado de forma correta ou aceitável em grande parte da BHRG, mas existem conflitos de uso.

O conhecimento sobre o uso do solo junto à caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica facilita a avaliação de possíveis efeitos de perturbações ao ecossistema e contribui para o planejamento adequado da exploração antrópica (OLIVEIRA et al., 2013). A Figura 2.4 e a Tabela 2.6 mostram a distribuição das classes de uso do solo e a caracterização morfométrica para as sub-bacias do Rio Grande, respectivamente.

Figura 2.4 - Distribuição das classes de uso do solo entre as sub-bacias do Rio Grande.



Fonte: Adaptado de ANA (2015).

Pode-se observar o predomínio de pastagem e cana-de-açúcar na BHRG. Ademais, identifica-se o cultivo de cana-de-açúcar em sub-bacias de relevo

plano a suave ondulado. Em sub-bacias com relevo mais acidentado, predominam-se as pastagens. A amplitude altimétrica (Hmax –Hmin) é elevada e a densidade de drenagem (Dd) foi considerada baixa em todas as sub-bacias. A hierarquização da rede fluvial (Ord) variou entre terceira e quarta ordem (STRAHLER, 1957) e a declividade média (Dm) variou de 0,51% (plano) a 21,64% (ondulado) (EMBRAPA, 1979) entre as sub-bacias. É importante destacar que a declividade é um fator limitante à produção agrícola e relaciona-se com a intensidade tolerável de uso do solo.

Tabela 2.6 - Características morfométricas das sub-bacias do Rio Grande.

	Ord	A	P	LCP	Lax	CT	LCN*	Hmax	Hmin	Dd	Dm	RN
<b>Sub1</b>	3	8017,14	412,81	117,20	126,06	989,68	1365461,00	642	312	0,12	0,51	0,06
<b>Sub2</b>	4	7033,69	424,21	112,27	108,89	127,10	13279508,92	776	367	0,02	5,66	0,10
<b>Sub3</b>	4	9956,64	548,70	180,84	210,77	1198,98	18397600,03	762	371	0,12	5,54	0,67
<b>Sub4</b>	4	15088,49	737,43	231,73	195,56	1879,99	32391461,88	1226	413	0,12	6,44	0,80
<b>Sub5</b>	4	5203,95	418,56	93,04	124,94	782,09	6777040,61	870	441	0,15	3,91	0,59
<b>Sub6</b>	4	9205,83	479,46	162,22	151,04	1448,16	40627430,84	1443	620	0,16	13,24	2,08
<b>Sub7</b>	3	6753,08	539,97	302,74	208,79	1620,00	17332246,04	1282	460	0,24	7,70	1,85
<b>Sub8</b>	3	10351,18	623,38	355,89	198,50	3075,60	34318554,71	1559	482	0,30	9,95	2,96
<b>Sub9</b>	3	17906,59	887,35	460,76	307,23	4115,60	56881875,18	1687	483	0,23	9,53	2,19
<b>Sub10</b>	4	16209,60	840,17	285,19	195,01	1703,63	70951231,85	1478	729	0,11	13,13	1,38
<b>Sub11</b>	4	2427,81	258,24	107,06	77,40	1987,18	14673057,56	1796	858	0,82	18,13	14,84
<b>Sub12</b>	3	10605,79	795,62	215,34	191,78	3614,31	50946273,42	1495	749	0,34	14,41	4,91
<b>Sub13</b>	4	8905,73	505,87	202,77	130,74	5493,06	49287576,49	2647	796	0,62	16,60	10,24
<b>Sub14</b>	3	6964,31	515,19	240,39	141,59	1266,04	46198627,29	2754	753	0,18	19,90	3,62
<b>Sub15</b>	4	9630,04	651,35	274,02	154,35	2231,30	69476708,56	2228	755	0,23	21,64	5,01

Sub – Sub-bacia; Ord – Ordem; A – Área (km<sup>2</sup>); P – Perímetro (km); LCP – Comprimento do Canal Principal (km); Lax – Comprimento do Eixo Axial da Sub-bacia (km); CT – Comprimento Total dos Cursos d'Água (km); LCN – Comprimento Total das Curvas de Nível (m); Hmax – Altitude Máxima (m); Hmin (Altitude Mínima); Dd – Densidade de Drenagem (km.km<sup>-2</sup>); Dm – Declividade Média (%); RN - Coeficiente de Rugosidade (adimensional) \*equidistância entre as curvas de nível - Δh = 30m

Conforme mencionado anteriormente, baixos valores de Dd associam-se a regiões de rochas permeáveis e de regime pluviométrico caracterizado por chuvas pouco intensas (LIMA, 2008). Hiruma e Ponçano (1994) estudaram a relação entre a densidade de drenagem e fatores geomorfológicos e pedológicos na área do Alto Rio Pardo (SP/MG). Os autores concluíram que

baixos valores de Dd ( $< 1,5 \text{ km.km}^{-2}$ ) concentram-se nos latossolos da Depressão Periférica, cujo substrato são os terrenos sedimentares da Bacia do Paraná. Os solos e as rochas permeáveis em terrenos de topografia suave podem ter possibilitado a menor razão deflúvio/infiltração, implicando baixos valores de Dd. Ao realizar a caracterização morfométrica e a determinação do uso potencial do solo para a microbacias do Rio Uberaba, Valle Junior et al. (2013) corroboram ao concluir que os latossolos apresentaram menor eficiência de drenagem.

Neste estudo, obtivemos amplitude do RN (Amp) = 14,78 e o intervalo de classes (I) = 3,70. Desta forma, os limiares para cada classe de uso potencial do solo são apresentados na Tabela 2.7.

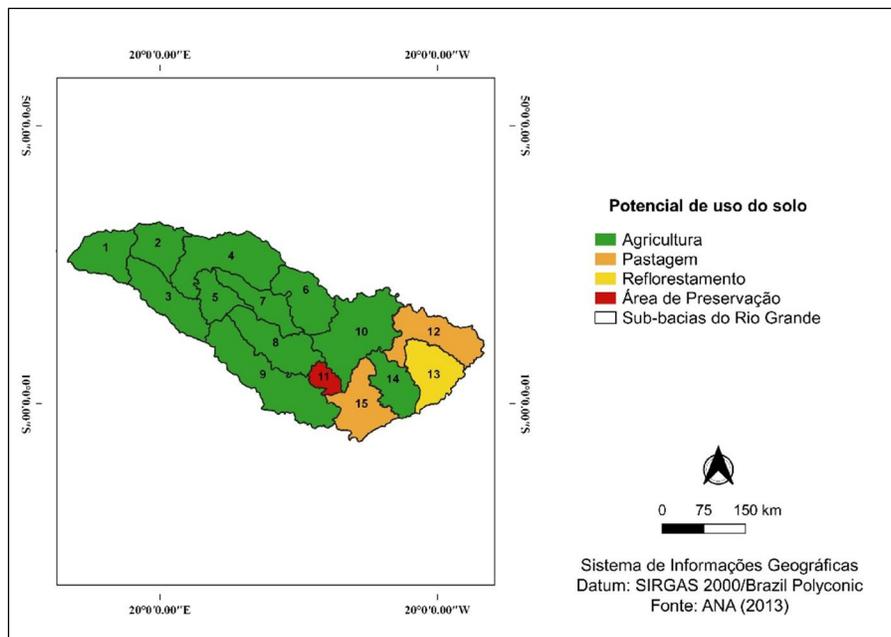
Tabela 2.7 - Limiares para as classes de RN para as sub-bacias do Rio Grande.

Potencial de uso do solo	Limiares para as classes de RN
Agricultura	0,06 a 3,76
Pastagem	3,77 a 7,47
Reflorestamento	7,48 a 11,18
Preservação	11,19 a 14,86

Grande parte das sub-bacias do Rio Grande têm potencial de uso agrícola (RN 0,06 a 3,76) (Ver Tabela 3.6 com os valores de RN por sub-bacia), o que é condizente com o relevo pouco acidentado e o predomínio dos latossolos (HIRUMA; PONÇANO, 1994; HORTON, 1955; LIMA, 2008). Entretanto, a sub-bacia 11 tem potencial de uso para preservação, as sub-bacias 12 e 15 têm potencial de uso para pastagem e a sub-bacia 13 tem potencial de uso para reflorestamento. Resultados semelhantes foram obtidos por Valle Junior et al. (2013) para as microbacias do Rio Uberaba. Os autores concluíram que 47,12% da área têm potencial de uso agrícola, 36,37% têm potencial de uso para pastagem, 11,86% têm potencial de uso para reflorestamento e 1,40% tem potencial de uso para preservação. Vale ressaltar que as microbacias do Rio Uberaba estão inseridas na BHRG.

Com relação ao solo, observa-se que, nas áreas aptas ao reflorestamento ou preservação, os cambissolos predominam. A Figura 2.5 apresenta o uso potencial do solo para as sub-bacias do Rio Grande e a Tabela 2.8 mostra a proporção dos tipos de solo por sub-bacia. Os cambissolos ocorrem em diversos ambientes, mas normalmente associam-se a áreas de relevos acidentados (ondulados a montanhosos). Em ambientes íngremes, os cambissolos mais rasos limitam a produção agrícola devido à alta susceptibilidade à erosão e à mecanização agrícola dificultada. Em contrapartida, os latossolos, predominantes na BHRG, apresentam alto potencial para o uso agrícola devido às boas condições físicas e aos relevos mais suaves. As limitações dos latossolos relacionam-se à baixa fertilidade e retenção de umidade quando a textura é grosseira e o clima é mais seco (EMBRAPA, 2013).

Figura 2.5 - Uso potencial do solo para as sub-bacias do Rio Grande.



O planejamento inadequado do uso do solo ocasiona conflitos (OLIVEIRA et al., 2013) que podem ocorrer em duas situações: (1) o uso atual contraria a recomendação obtida a partir do RN e superestima a capacidade de suporte do

solo ou (2) o uso do solo é subestimado, apresentando baixa produtividade (VALLE JUNIOR et al., 2013).

Neste estudo, consideramos "uso aceitável" as áreas preservadas com vegetação natural, as áreas com potencial agrícola usadas para pastagem ou reflorestamento e as áreas com potencial para pastagem usadas para reflorestamento. Além disso, consideramos "conflito" as áreas edificadas e "uso correto" as áreas de mananciais (Tabela 2.9).

A Tabela 2.10 mostra os usos corretos, os aceitáveis e os conflitos de uso do solo nas sub-bacias do Rio Grande. Em grande parte das sub-bacias, predomina-se o uso correto ou aceitável do solo. Entretanto, a sub-bacia 11 destacou-se como a de maior risco de degradação ambiental da BHRG (RN = 14,84 – maior valor), apresentando conflitos classe 1, 2 e 3. A sub-bacia 13 (RN = 10,24) apresentou conflitos classe 1 e 2 e as sub-bacias 12 (RN = 4,91) e 15 (RN = 5,01) apresentaram conflitos classe 1 e 2, respectivamente.

Tabela 2.8 - Proporção dos tipos de solo nas sub-bacias do Rio Grande.

Sub-bacias	Proporção dos tipos de solo por sub-bacia do Rio Grande									
	Água	PVA	CX	LVA	RL	RQ	NV	OY	PV	LV
Sub1	10,61	10,87	—	—	—	—	—	—	34,11	44,41
Sub2	6,25	—	—	—	—	—	—	—	21,06	72,70
Sub3	0,69	83,06	—	—	—	—	—	—	—	16,25
Sub4	5,43	9,37	0,35	10,91	—	—	0,03	—	3,83	70,08
Sub5	—	3,41	—	1,48	—	—	—	—	—	95,11
Sub6	3,16	0,86	5,21	18,33	17,12	—	—	—	—	55,32
Sub7	0,17	0,06	—	16,89	—	7,83	—	—	—	75,06
Sub8	—	32,12	0,72	12,19	—	8,11	—	—	—	46,85
Sub9	—	23,63	3,12	11,69	—	—	—	2,56	0,00	59,01
Sub10	9,26	16,42	20,55	5,13	0,27	—	—	—	—	48,38
Sub11	—	18,19	70,02	—	—	—	—	—	—	11,79
Sub12	—	9,33	36,06	33,15	—	—	—	—	—	21,46
Sub13	1,29	0,75	93,04	0,00	—	—	—	—	—	4,92
Sub14	—	—	25,67	24,09	—	—	—	—	—	50,24
Sub15	—	4,40	5,04	37,91	—	—	—	—	—	52,65

PVA - Argissolo Vermelho-Amarelo; CX – Cambissolo; LVA – Latossolo Vermelho-Amarelo; RL – Neossolo Litólico; RQ – Neossolo Quartzarênico; NV – Nitossolo Vermelho; OY – Organossolo Mésico; PV – Argissolo Vermelho; LV – Latossolo Vermelho.

Tabela 2.9 - Conflitos de uso do solo em função do uso atual x uso potencial.

Uso atual do solo	Potencial de uso do solo			
	Agricultura	Pastagem	Reflorestamento	Preservação
Agricultura	Correto	Conflito 1	Conflito 2	Conflito 3
Pastagem	Aceitável	Correto	Conflito 1	Conflito 2
Reflorestamento	Aceitável	Aceitável	Correto	Conflito 1
Preservação	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Correto
Área Edificada	Conflito	Conflito	Conflito	Conflito
Água	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável

Vale ressaltar que, ao sugerirmos que o solo está sendo usado de forma correta ou aceitável, não significa que poderá ser manejado inadequadamente, ou está isento de cuidados. O emprego das técnicas de conservação do solo implicará manutenção da sua capacidade de suporte.

Uma observação preocupante sobre o uso do solo na BHRG é a baixa proporção de vegetação natural preservada, especialmente em áreas de relevo plano a suave ondulado. Isso sugere a supressão da vegetação natural para a expansão agropecuária. Assim, considerando a relevância da vegetação natural para a manutenção da qualidade e disponibilidade hídrica, o seu uso na BHRG é aceitável independentemente do valor do RN.

Valle Junior et al. (2013) recomendaram ações para cada classe de conflito ambiental. Em áreas de conflito classe 1, há riscos/limitações severas ou permanentes quando usadas para o cultivo de culturas anuais e pastagens. Desta forma, é fundamental a implementação conjunta de técnicas de conservação do solo, especialmente de caráter vegetativo e mecânico. Em áreas de conflito classe 2, é recomendado o estabelecimento de pastagem ou reflorestamento ou ainda mantê-las preservadas. Isso porque áreas com conflito classe 2 são impróprias para agricultura intensiva. Finalmente, para as áreas de conflito classe 3, é recomendada a preservação porque são impróprias para agricultura ou pastagem.

Tabela 2.10 – Identificação dos conflitos ambientais nas sub-bacias do Rio Grande

Sub-bacias	Uso do solo (%) - Sub-bacias do Rio Grande							Potencial de Uso	Conflito de uso
	Agricultura	Pastagem	Reflorestamento	Área de Preservação	Área Edificada	Água			
Sub1	55,13	32,48	0,01	7,67	1,22	3,50	Agricultura		
Sub2	59,93	28,08	—	7,55	1,02	3,42	Agricultura		
Sub3	67,98	21,89	0,01	6,90	2,05	1,17	Agricultura		
Sub4	58,17	28,82	—	10,37	0,61	2,03	Agricultura		
Sub5	71,25	18,26	0,03	8,31	1,39	0,76	Agricultura		
Sub6	38,53	41,36	0,09	14,96	0,66	4,40	Agricultura		
Sub7	54,31	30,30	1,11	12,53	1,29	0,46	Agricultura		
Sub8	53,02	31,39	1,35	12,64	1,52	0,08	Agricultura		
Sub9	48,51	39,98	1,21	8,65	1,58	0,07	Agricultura		
Sub10	22,64	58,13	—	16,19	0,64	2,40	Agricultura		
Sub11	31,47	56,31	1,4	9,66	1,06	0,09	Preservação	Classe 1	
Sub12	17,37	65,19	0,10	13,58	0,67	3,09	Pastagem	Classe 2	
Sub13	7,34	74,62	0,15	16,70	0,84	0,36	Reflorestamento	Classe 3	
Sub14	17,45	66,28	—	13,67	0,16	2,44	Agricultura	Edificações	
Sub15	23,1	61,07	—	11,98	0,59	3,26	Pastagem	Aceitável	

Conflito de uso
Classe 1
Classe 2
Classe 3
Edificações
Aceitável
Uso Correto

É notório que, em algumas sub-bacias do Rio Grande, as recomendações não são seguidas. A sub-bacia 11, especialmente, deveria ser preservada. Entretanto, mais de 90% da sua área é conflitante por ser destinada à pastagem (aproximadamente 56% da área), agricultura, reflorestamento ou edificações e menos de 10% é preservada. Com predomínio de cambissolos (70% da área total) e relevo ondulado, a susceptibilidade à erosão é alta (EMBRAPA, 2013). Os cambissolos também predominam na sub-bacia 13, com potencial de uso para reflorestamento. Nessa sub-bacia houve conflitos classe 1 e 2, o relevo é ondulado e menos de 17% da área total é preservada.

A perda de solo por erosão é o principal impacto causado por conflitos de uso do solo. Conseqüentemente, ocorre a redução da produtividade agrícola, redução da matéria orgânica do solo, lixiviação de nutrientes, deterioração da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, redução da biodiversidade e outros prejuízos quanto aos serviços ecossistêmicos prestados (COSTA et al., 2019; VALERA et al., 2016).

Atualmente, poucos países no mundo estabeleceram critérios técnicos e legais para o uso, ocupação e conservação dos solos. O “princípio do poluidor-pagador” é uma exceção, em vigor no Brasil, que alerta para a responsabilidade legal e social da conservação do solo (VALERA et al., 2017). De acordo com este princípio, o proprietário da terra deve mitigar ou mesmo reparar os impactos ambientais em decorrência de práticas insustentáveis (COSTA et al., 2019). As Áreas de Preservação Permanente (APPs), nos termos dos artigos 4º, 5º e 6º da Lei nº 12.651 / 12 (Novo Código Florestal), são definidas como: “áreas protegidas, cobertas ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitando o fluxo gênico da fauna e flora, protegendo o solo e garantindo o bem-estar das populações humanas” (VALERA et al., 2019). Considerando a baixa proporção de vegetação natural preservada na BHRG, especialmente em sub-bacias aptas à produção agrícola, podemos inferir que as delimitações de APPs não estão condizentes com a legislação (que prevê, no mínimo, 30 m de largura). Além disso, Valera

et al. (2017) concluíram que faixas de 30 m de largura de APP são insuficientes para a manutenção da qualidade da água.

O ponto forte deste estudo é o avanço no conhecimento relacionado ao uso potencial do solo na BHRG, já que é o primeiro que abrange toda a bacia. A determinação do potencial de uso para as sub-bacias do Rio Grande e a identificação de áreas conflitantes podem subsidiar o planejamento de ações, a gestão territorial e a gestão integrada da água.

Entretanto, a maior limitação deste estudo é a redução da eficácia da metodologia RN à medida que aumenta a área de contribuição da bacia. Devido ao aumento da heterogeneidade, os valores de Dd e Dm podem ser insuficientes para discriminar o potencial de uso do solo em grandes bacias (COSTA et al., 2019).

Neste estudo, consideramos o método do RN eficiente, especialmente por discriminar os usos potenciais, apesar da baixa densidade de drenagem constatada em todas as sub-bacias. Ao testar o método para a BHRG, sem compartimentá-la em sub-bacias, o RN encontrado foi de 0,92. Valores baixos de RN sugerem potencial de uso agrícola (ROCHA e KURTZ, 2001). Ou seja, o resultado seria menos condizente com a realidade, apesar de grande parte das sub-bacias apresentarem potencial de uso para agricultura.

Os resultados apresentaram o enorme potencial agropecuário da BHRG. Entretanto, é importante destacar que o desenvolvimento socioeconômico deve estar atrelado à qualidade ambiental. Para isso, é necessário integrar a gestão de recursos hídricos com outros setores da administração pública que afetam a qualidade e disponibilidade de água (GUIDOLINI et al., 2018). A gestão do território, intimamente relacionada ao uso e à ocupação do solo, deve ser trabalhada em concordância com as políticas ambientais, sociais e de desenvolvimento. A sustentabilidade é a melhor abordagem para este fim.

Estudos futuros, inclusive pesquisas de sustentabilidade, podem usar o conflito ambiental, em escala de bacia hidrográfica, como indicador de risco de degradação do solo. Além disso, para melhorar a eficácia da metodologia, sugerimos o refinamento do método RN a partir do cruzamento de dados de

solos, declividade média e coeficiente de Rugosidade (OLIVEIRA et al. 2013) ou integrando variáveis de relevo (RN), forma de relevo (dissecação) e propriedades do solo (susceptibilidade magnética) (COSTA et al., 2019), por exemplo. Além disso, é possível compartimentar as sub-bacias em áreas menores (microbacias).

Em resumo, os resultados sugerem elevado potencial agrícola na BHRG e mostram a presença de conflitos ambientais classe 1, 2 e 3. A baixa proporção de vegetação natural nas sub-bacias indica supressão da vegetação em função da expansão agropecuária. Conhecendo a relevância da vegetação natural para a manutenção da qualidade e disponibilidade de água, torna-se fundamental a fiscalização acerca do cumprimento das leis ambientais e a efetividade do Princípio Poluidor-Pagador.

#### **2.2.2.5 Conclusão**

Este estudo apresentou o uso potencial do solo nas sub-bacias do Rio Grande e identificou áreas de conflito ambiental, a partir das variáveis morfométricas Dd (densidade de drenagem) e Dm (declividade média).

A Dd foi baixa para todas as sub-bacias ( $< 0,5 \text{ km.km}^{-2}$ ). Já a Dm variou de 0,51% (plana) a 21,64% (ondulada). Com relação aos tipos de solos, destacaram-se os latossolos (em relevos mais planos) e os cambissolos (em relevos mais acidentados).

No geral, as sub-bacias do Rio Grande apresentaram potencial para uso agrícola (73,3%). As sub-bacias 12 e 15 apresentaram potencial de uso para pastagem. A sub-bacias 11 e 13 apresentaram potencial de uso para preservação e reflorestamento, respectivamente.

Houve conflitos ambientais classe 1, 2 e 3 na Bacia do Rio Grande. As sub-bacias 11 e 13 destacaram-se com 90,24% e 82,80% de áreas conflitantes em relação à área total da sub-bacia, respectivamente.

Ao sugerirmos que o solo está sendo usado de forma correta ou aceitável não significa que poderá ser manejado inadequadamente, ou está isento de

cuidados. O emprego conjunto de técnicas de conservação do solo implicará manutenção da sua capacidade de suporte.

A baixa proporção de vegetação natural nas sub-bacias indica supressão da vegetação em função da expansão agropecuária. Assim, torna-se primordial a fiscalização acerca do cumprimento das leis ambientais e a efetividade do Princípio Poluidor-Pagador.

O método do RN e a teoria de conflito foram eficientes para determinar o potencial de uso do solo e áreas de conflito ambiental nas sub-bacias do Rio Grande. Entretanto, a eficácia desta metodologia pode diminuir em função do aumento da área de contribuição da bacia.

Dada a relevância do tema, o conflito ambiental pode ser usado como indicador de risco de degradação do solo em pesquisas de sustentabilidade para bacias hidrográficas.

Este estudo contribui para o avanço no conhecimento relacionado ao uso potencial do solo na BHRG, já que é o primeiro que abrange toda a bacia. A determinação do potencial de uso do solo para as sub-bacias do Rio Grande e a identificação de áreas conflitantes podem subsidiar a gestão territorial e a gestão integrada da água.

## **2.3 Análise exploratória de indicadores do diagnóstico de situação dos recursos hídricos da BHRG: caracterização geral das UGHs<sup>5</sup>**

### **2.3.1 Introdução**

A gestão integrada dos recursos hídricos é a que promove o desenvolvimento e gerenciamento coordenado da água, do solo e dos recursos relacionados, maximizando o desenvolvimento socioeconômico e assegurando a

---

<sup>5</sup> Subcapítulo baseado no artigo: GUIDOLINI, J. F.; OMETTO, J.P.B.; GIAROLLA, A.; TOLEDO, P.M., VALERA, C.A. Legal Basis for Water Resources Management in Brazil: Case Study of Rio Grande Basin. **World Academy Of Science, Engineering And Technology**, [s.l.], v. 12, n. 3, p.268-274, 2018a.

sustentabilidade dos ecossistemas (GWP, 2004). A política nacional de recursos hídricos tem a bacia hidrográfica como unidade de planejamento territorial e, por se tratar de um sistema complexo, deve ser abordada de forma sistêmica e integrada.

O primeiro passo para gerenciar uma bacia hidrográfica no Brasil é realizar uma avaliação ou diagnóstico de situação dos recursos hídricos. O diagnóstico ajuda o analista a compreender as condições atuais da bacia, auxilia na identificação e priorização dos principais problemas e possibilita estudos de cenários futuros (GWP, 2004). No Brasil, o diagnóstico de situação é a primeira etapa para a construção do Plano Integrado de Recursos Hídricos (PIRH).

A efetividade da gestão de águas requer um conjunto de dados bem desenvolvidos e confiáveis para alimentar um sistema de apoio à decisão em escalas diversas (municipal, estadual, nacional, bacia hidrográfica). Entretanto, a qualidade dos dados brasileiros varia de região para região (ODCE, 2015).

O diagnóstico de situação dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG) foi publicado em 2008, pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2008). A elaboração desse documento baseou-se no método FMPEIR (Força Motriz- Pressão-Estado-Impacto-Resposta), a fim de analisar a situação hídrica atual e determinar a capacidade que os indicadores têm de alterar o estado da água. Entretanto, Ferraz et al. (2011), colaboradores na elaboração dos relatórios de situação das bacias hidrográficas do estado de São Paulo entre 2007 e 2008 (inclusive para a Bacia do Rio Grande), evidenciaram algumas dificuldades: (1) representatividade do conjunto de indicadores selecionados; (2) comunicação com os órgãos que disponibilizam os dados; (3) a análise evolutiva dos fenômenos retratados no relatório depende da continuidade (série histórica); (4) disponibilidade e formato dos dados muito distintos; (5) dados sob contextos espaciais diferentes necessitam de desagregação; (6) data dos dados desuniforme.

Muitas vezes, um pequeno número de variáveis contém as informações mais importantes, ou seja, são as principais responsáveis pela variação dos dados dentro da amostra. A decisão sobre quais variáveis são mais relevantes pode

ser feita por meio da análise exploratória dos dados ou estatística multivariada. A análise de componentes principais (ACP) e de agrupamento hierárquica, por exemplo, são técnicas de estatística multivariada complementares que têm grande aceitação em estudos ambientais (LATTIN, 2011).

Diante disso, este estudo selecionou indicadores do diagnóstico de situação da BHRG, disponíveis para os estados de Minas Gerais e São Paulo, a fim de fazer uma análise exploratória dos dados. O objetivo é compreender e conhecer a real situação da bacia e apontar os principais agravantes que impedem a efetividade da política de recursos hídricos. É esperado que a análise exploratória dos dados do diagnóstico aponte os principais problemas na BHRG, relacionados à gestão hídrica, às similaridades e divergências entre os Estados e às unidades de gestão hídrica.

## **2.3.2 Material e métodos**

### **2.3.2.1 Análise exploratória dos dados**

Para este trabalho, usamos o conjunto de indicadores sociais, econômicos, ambientais e institucionais publicados no diagnóstico de situação dos recursos hídricos da BHRG. Os dados são para o ano 2000 e o diagnóstico foi publicado em 2008 (IPT, 2008).

Desta forma, selecionamos os indicadores com dados disponíveis para os Estados de Minas Gerais e São Paulo, totalizando 33 indicadores. O conjunto de dados foi submetido à análise exploratória, empregando as técnicas de análise de agrupamento (análise de cluster) e análise de componentes principais (ACP) (CARDOSO et al., 2016). A análise de agrupamento e ACP foram realizadas após a normalização dos dados com a finalidade de evitar erros de classificação em decorrência das grandes diferenças de dimensionamento dos dados. (HONGYU; SANDALIELO; OLIVEIRA JUNIOR, 2015).

### **2.3.2.2 Política de recursos hídricos na BHRG**

No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) corresponde à Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997. Entretanto, a sua aplicação nos estados brasileiros ocorreu de forma variada. No caso da BHRG, as leis estaduais de recursos hídricos foram criadas em diferentes épocas e com algumas diferenças em relação à lei federal. O Estado de São Paulo foi pioneiro na criação da lei estadual de recursos hídricos, antes mesmo da lei federal entrar em vigência. Segundo a Agência Nacional de Águas – ANA (2015):

O Estado de São Paulo foi pioneiro na institucionalização de uma Política de Recursos Hídricos no Brasil, ao publicar a Lei Estadual nº 7.663, de 1991. Em âmbito federal, a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH – foi instituída pela Lei nº 9.433, de 1997, a qual também estabeleceu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH, em cumprimento ao disposto na Constituição Federal de 1988 (Art. 21, inciso XIX). No estado de Minas Gerais, a Política Estadual de Recursos Hídricos foi estabelecida pela Lei Estadual nº 13.199, de 1999, que também dispõe sobre o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e foi regulamentada pelo Decreto nº 41.578, de 2001 (ANA, 2015.p. 3).

Os instrumentos de gestão de recursos hídricos previstos na Lei Federal 9.433/1997 são: a) os planos de recursos hídricos; b) o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; c) outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; d) cobrança pelo uso de recursos hídricos e) sistema de informações sobre recursos hídricos (BRASIL, 1997).

O diagnóstico de situação das águas é requisito obrigatório para a criação do plano integrado de recursos hídricos de uma bacia hidrográfica brasileira. No Estado de São Paulo, os planos de bacia não são caracterizados como instrumentos de gestão. Independentemente disso, eles devem ser elaborados e atualizados pelos comitês de bacia. O mesmo acontece com o enquadramento dos corpos d'água em classes, mas está contido nos planos.

Diferentemente da lei federal, São Paulo considera como instrumentos de gestão as infrações, penalidades e rateio de custos das obras (ANA, 2015).

No Estado de Minas Gerais, os instrumentos de gestão previstos na política estadual são os seguintes a) plano estadual de recursos hídricos; b) planos diretores de recursos hídricos de bacias hidrográficas; c) sistema estadual de informações sobre recursos hídricos; d) enquadramento dos corpos de água em classes, segundo seus usos preponderantes; e) outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; f) cobrança pelo uso de recursos hídricos; g) compensação a municípios pela exploração e restrição de uso de recursos hídricos; h) rateio de custos das obras de uso múltiplo, de interesse comum ou coletivo i) penalidades (ANA, 2015).

É notório que existem diferenças entre as leis estaduais vigentes na BHRG, mas a heterogeneidade vai muito além do embasamento legal. Há diferenças socioeconômicas, culturais, ambientais, entre outras. Conhecer e compreender as suas características e os principais fatores que interferem na efetividade da gestão hídrica na BHRG é o objetivo deste estudo.

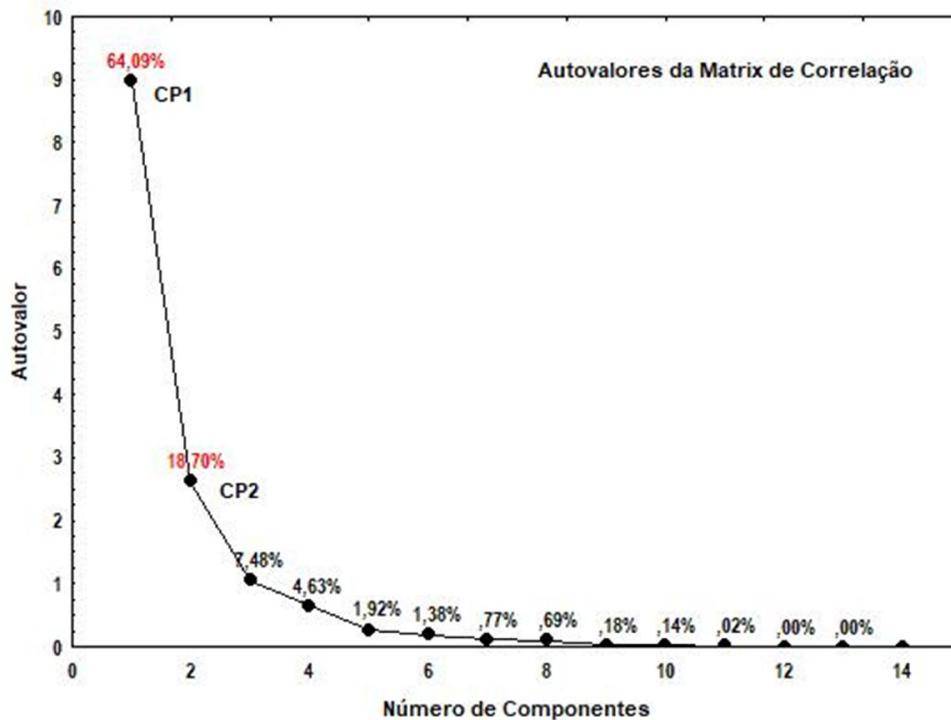
### **2.3.2.3 Resultados e discussão**

Este estudo teve como propósito fazer uma análise exploratória dos dados apresentados no diagnóstico de situação dos recursos hídricos da BHRG, apoiada na legislação vigente, a fim de identificar as particularidades dos Estados e respectivas unidades de gestão hídrica. A hipótese deste estudo é que a análise exploratória facilita a compreensão acerca da realidade da bacia. Isso implica identificação de áreas que carecem de maior atenção por parte dos tomadores de decisão, podendo gerar novas discussões, inclusive sobre a efetividade da política de recursos hídricos.

Para este tipo de abordagem, é necessário ter uma visão integrada e sistêmica da unidade de trabalho. Isso porque a gestão de águas é frequentemente uma resposta involuntária da cultura, regime jurídico, sistema político e organização territorial do país (OECD, 2015). Seguindo essa premissa, a análise exploratória dos dados do diagnóstico pode facilitar a compreensão dos

gestores indicando as variáveis responsáveis pelas maiores variações dos dados, sem perdas significativas de informação (LATTIN et al.,2011). Entre os 33 indicadores selecionados a partir do diagnóstico de situação das águas, apenas 14 se destacaram na Análise de Componentes Principais (ACP). Para esta análise, foram considerados os componentes principais 1 e 2 (CP1 e CP2), com autovalor superior a 1. O CP1 e CP2 foram responsáveis por sintetizar uma variância acumulada dos dados de 82.79%, sendo 70% o mínimo recomendado (VICINI, 2005) (Figura 2.6).

Figura 2.6 – Autovalores da matriz de correlação. Variância acumulada do CP1 e CP2.



Os indicadores selecionados, as unidades, valores reais para cada Estado, correspondência na matriz FPEIR, média e desvio-padrão podem ser observados na Tabela 2.11. É notório que existem diferenças entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo.

Tabela 2.11 – Descrição dos indicadores.

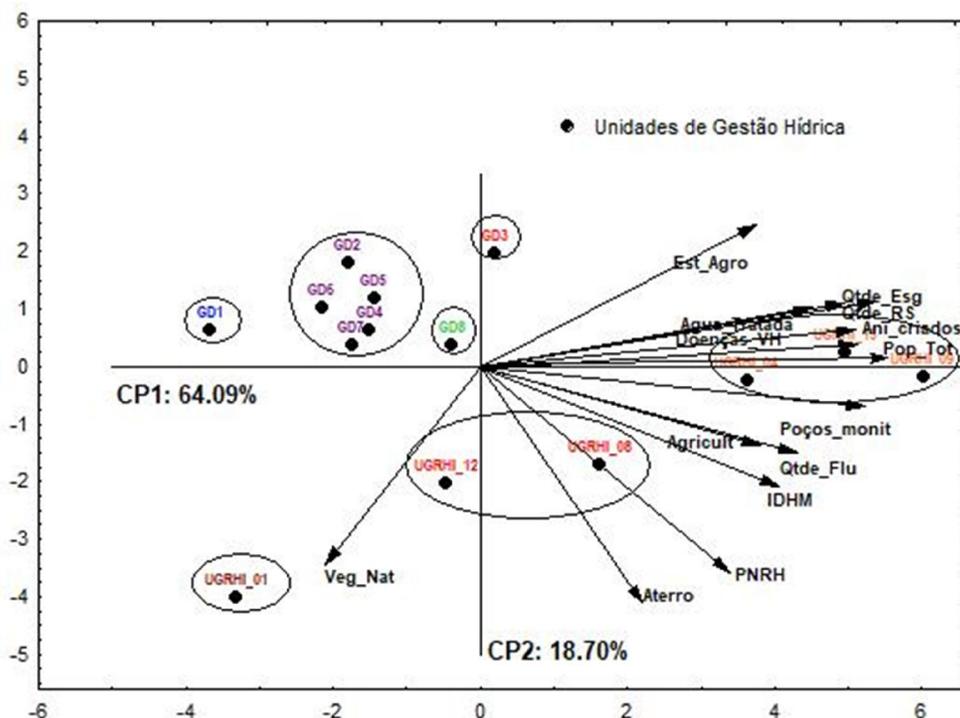
Indicador	Unidade	Minas Gerais	São Paulo	FPEIR	Média	Desvio-Padrão
População Total ( <b>Pop_Tot</b> )	Nº de habitantes	3714345	4907529	Força Motriz	615848,1	413934,8
Quantidade estimada de água tratada consumida por ano ( <b>Agua_Tratada</b> )	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /ano	122,57	3717,34	Força Motriz	35,4	23,2
Quantidade de estabelecimentos agropecuários ( <b>Est.Agro</b> )	Nº	25074	19144	Força Motriz	3158,4	1641,9
Quantidade de cabeças de animais criados ( <b>Ani_Criados</b> )	Nº	26889,845	67978,645	Força Motriz	6,8	8,1
Proporção de área ocupada por agricultura ( <b>Agricult</b> )	%	22,06	57,34	Força Motriz	37,5	27,0
Quantidade estimada de esgoto doméstico produzido por ano ( <b>Qtde_Esg</b> )	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /ano	183,69	237,66	Pressão	30,1	19,7
Quantidade estimada de resíduos sólidos produzidos por ano ( <b>Qtde_RS</b> )	10 <sup>3</sup> t/ano	987,93	1218,17	Pressão	162,1	106,01
Índice de Desenvolvimento Humano Municipal ( <b>IDHM</b> )	Adimensional	0,763	0,788	Pressão	0,77	0,0
Quantidade anual de internações por doenças de veiculação hídrica ( <b>Doencas_V.H</b> )	Nº por ano	6567	10715	Impacto	1234,4	1053,2
Proporção de municípios com aterro sanitário ( <b>aterro</b> )	%	19,51	47,53	Resposta	33,1	18,1
Proporção de poços monitorados em relação ao total de poços de rede de monitoramento ( <b>Poços_Monit</b> )	%	0	26,26	Resposta	3,2	5,2
Quantidade de instrumentos da PNRH implementados em relação ao total de 5 instrumentos ( <b>PNRH</b> )	Nº	1	3	Resposta	1,9	1,0
Quantidade de fluviômetros instalados ( <b>Qtde_Flu</b> )	Nº	6	41	Resposta	3,4	4,0
Proporção de área com cobertura vegetal nativa ( <b>Veg_Nat</b> )	%	3,44	3,48	Resposta	6,9	13,0

t: tonelada nº: número/quantidade

Fonte: IPT (2008).

Considerando a FPEIR, a ACP não selecionou indicadores de estado, que se referem à qualidade e disponibilidade de água. Além disso, a análise dividiu as unidades de gestão hídrica em 7 grupos (Figura 2.7).

Figura 2.7 – Análise de Componentes Principais (ACP) (CP1 X CP2).



É possível observar na Tabela 2.12 o valor dos autovetores e suas associações (positivas ou negativas), o que definiu o sentido das flechas. O CP1 se refere às associações positivas com os indicadores de Força Motriz, Pressão e Impacto. Já o CP2 se refere às associações negativas com os indicadores de Resposta e a proporção de área cultivada (indicador de Força Motriz). A proporção de vegetação natural preservada apresentou associação negativa nos dois componentes, sendo mais significativa no CP2.

É possível inferir a partir desta análise que os Estados de Minas Gerais e São Paulo são bastante heterogêneos. As deficiências no saneamento ambiental têm relação com a urbanização e atividades agropecuárias, repercutindo na saúde da população (CP1) e problemas de infraestrutura, especialmente para o monitoramento da água, relacionando-se com o desenvolvimento regional e implementação dos instrumentos de gestão hídrica (CP2).

Tabela 2.12 – Autovetores da matriz de correlação.

	Componente Principal 1	Componente Principal 2
Agricult	0,228685	<b>-0,183935</b>
Qtde_Esg	<b>0,319253</b>	0,143222
Qtde_RS	<b>0,318952</b>	0,144264
IDHM	0,240929	<b>-0,263825</b>
Doenças_V.H	<b>0,308350</b>	0,081235
Aterro	0,131473	<b>-0,522928</b>
Poços_Monit	0,311125	<b>-0,091078</b>
PNRH	0,201374	<b>-0,450119</b>
Est_Agro	0,237167	0,310975
Ani_Criados	<b>0,306601</b>	0,042930
Agua_Tratada	<b>0,319247</b>	0,143269
Qtde_Flu	0,257929	<b>-0,203126</b>
Veg_Nat	<b>-0,122729</b>	<b>-0,430746</b>
Pop_Tot	<b>0,320199</b>	0,135675

A GD1 é a unidade de gestão hídrica com menor proporção de área cultivada e menor IDHM da BHRG, além de ter menor população total da vertente mineira. Além disso tem a segunda maior área de vegetação nativa preservada da vertente de Minas Gerais. Essas características diferenciaram a unidade das demais; contrariando as características da GD1, a GD8 tem a maior área cultivada e maior IDHM da vertente; A GD3, das unidades de gestão de Minas Gerais, é a que mais se assemelha com as unidades de gestão da vertente de São Paulo. Isso porque tem a segunda maior proporção de área cultivada e IDHM da vertente de Minas Gerais. Além disso, é a unidade que mais gera resíduos sólidos e esgoto sanitário. Já a GD2, GD4, GD5, GD6 e GD7 têm características semelhantes de desenvolvimento, aproximando-se da GD1 por terem área cultivada e IDHM menores que a GD3 e GD8. Além disso, este grupo contém, no geral, unidades de gestão hídrica com maiores proporções de vegetação nativa preservada. Vale destacar, por exemplo, que a proporção de vegetação nativa preservada na BHRG é menor que 15%.

Quanto às unidades de gestão da vertente paulista, começaremos destacando a UGHRI\_01, diferenciada entre todas as outras unidades da BHRG por ter a maior proporção de vegetação nativa preservada, menor população e proporção de área cultivada da bacia. Da vertente paulista, a UGRHI01 possui o menor valor de IDHM.

Em seguida, a UGRHI\_12 se aproxima da UGRHI\_01 por ter a segunda menor população, mas se assemelha também à UGRHI\_08 por serem as duas unidades de gestão com maior proporção de área cultivada da vertente paulista. Em seguida, observa-se o grupo constituído pela UGRHI\_04, UGRHI\_09 e UGRHI\_15, que se destacam pela maior geração de resíduos sólidos e esgoto sanitário e, conseqüentemente, com a maior quantidade de pessoas internadas com doenças de veiculação hídrica na BHRG.

A análise de agrupamento hierárquico único ou *Single Linkage* confirmou os grupos discretizados na ACP e suas características (Figuras 2.8 e 2.9). Este método é baseado na distância mínima, regra do vizinho mais próximo (LATTIN et al., 2011).

Figura 2.8 – Análise de agrupamento (Single Linkage) entre as unidades de gestão hídrica.

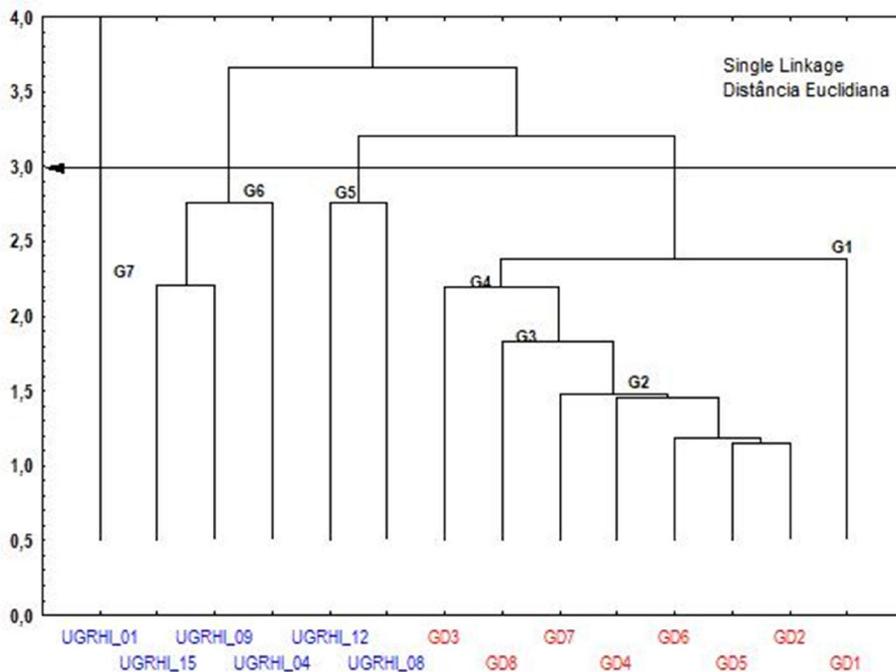
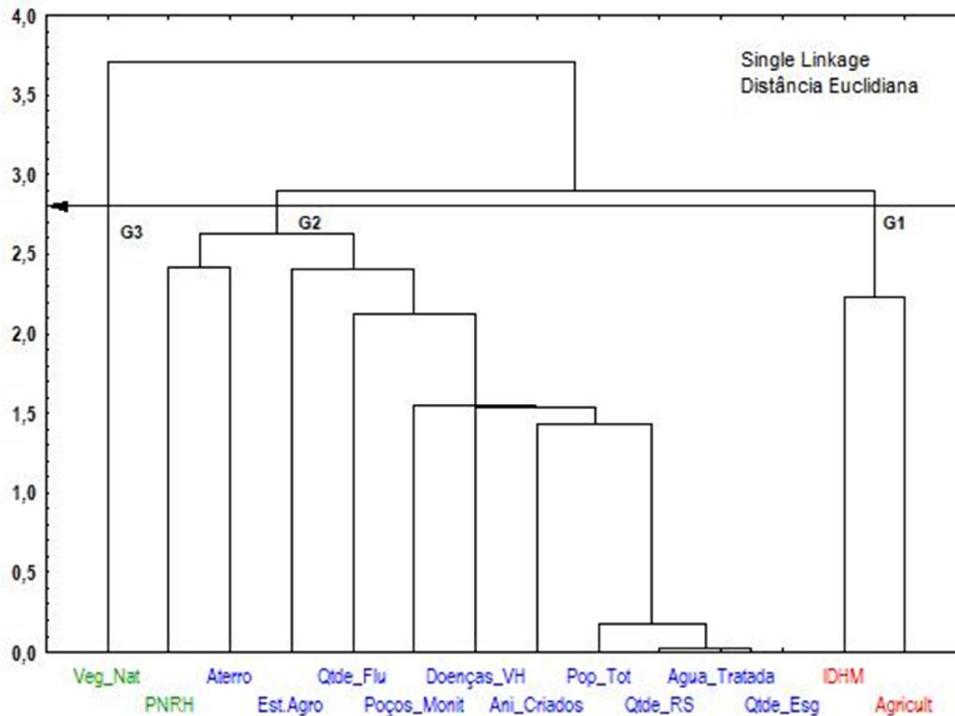


Figura 2.9 – Análise de agrupamento (Single Linkage) entre as variáveis.



A proporção de área cultivada nas unidades de gestão hídrica relaciona-se positivamente com o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM); em locais onde se predomina a agricultura, no geral, o desenvolvimento humano é maior e melhores estruturadas são as unidades de gestão, especialmente em relação ao monitoramento das águas e ao saneamento ambiental. Além disso, a implementação dos instrumentos de gestão hídrica previstos na política de recursos hídricos é, no geral, maior nas unidades de gestão mais desenvolvidas (com maior IDHM e área cultivada). Entretanto, mesmo nas regiões mais desenvolvidas, a quantidade de internações por doenças de veiculação hídrica é muito alta. Ou seja, a infraestrutura de saneamento e monitoramento da água é precária. Pequena proporção das águas superficiais da BHRG era monitorada (14.97%). As águas subterrâneas só têm monitoramento na vertente de São Paulo e foram consideradas insuficientes pelo diagnóstico de situação (IPT, 2008).

Diante disso, não é possível definir, com precisão, a real situação acerca da disponibilidade e qualidade hídrica a partir do diagnóstico de situação publicado. Apesar disso, o forte impacto da qualidade da água na saúde da população nos permite auferir que a potabilidade pode estar inadequada.

Diante do exposto, podemos inferir que as políticas públicas brasileiras são fragmentadas. Não há integração entre as políticas de desenvolvimento socioeconômico com as políticas de recursos hídricos. Essa preocupação deve estar presente nos níveis mais altos do governo federal e dos governos estaduais e ser colocada como prioritária na agenda dos conselhos de recursos hídricos estaduais e nacional (OCDE, 2015). O desenvolvimento traz consigo a expansão urbana, expansão agropecuária, a industrialização, as hidrelétricas e, conseqüentemente, o aumento da demanda por água.

Pegram et al (2013) estabeleceram dez regras para o planejamento efetivo de bacias hidrográficas: compreender todo o sistema; planejar e agir, mesmo sem conhecimento pleno; priorizar as questões que necessitam de atenção atual e adotar abordagem em etapas; a adaptação deve ser permitida, caso alguma coisa mude; aceitar a iteratividade do planejamento; elaboração de planos temáticos e consistentes; abordar as questões na escala apropriada, adequando os planos locais ao plano de bacia; estimular os atores envolvidos com vistas ao fortalecimento das relações institucionais; focar a implementação do plano de bacia e, por fim, selecionar os métodos e abordagem necessários para atender às necessidades da bacia.

O autor deixa claro que o trabalho com as questões hídricas é complexo, iterativo e multidisciplinar. É de suma importância conhecer a realidade do sistema e compreender a sua heterogeneidade. No caso da BHRG dois Estados são unidos por um rio. Ambos utilizam a água e este recurso é essencial para a vida e para o desenvolvimento regional; as legislações se diferem em relação aos instrumentos de gestão e o desenvolvimento acontece de forma diferenciada. Portanto, considerando a dinâmica da bacia, é necessário prever mudanças e como deverá ser a adaptação a elas. A gestão efetiva dos recursos hídricos requer um conjunto robusto de dados para

alimentar um sistema de apoio à decisão em nível nacional. Entretanto, a qualidade dos dados hidrológicos varia entre os estados brasileiros (ODCE, 2015) e essa variação pode ser observada neste estudo. Enquanto a legislação de recursos hídricos em São Paulo foi estabelecida no ano de 1991, em Minas Gerais isso só ocorreu em 1999.

Em primeiro lugar, a legislação paulista estabelecida ainda no princípio da década de 1990 (Lei 7.663/91), e sua decorrente regulamentação, propiciou que atualmente já se disponham de Comitês de Bacia estabelecidos há mais de 10 anos em todas as suas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs), enquanto na vertente mineira esse processo se encontra em fase de consolidação. Por decorrência, as 22 UGRHs de São Paulo já desenvolveram pelo menos um diagnóstico completo da situação de recursos hídricos e 15 delas, já possuem planos de bacia (IPT, 2008. p. 48).

A avaliação da efetividade da governança da água deve considerar problemas estruturais, que necessitam de compreensão e mitigação. É notório que na BHRG existem falhas tanto nas políticas e suas aplicações quanto na infraestrutura dos municípios. Com relação às políticas e sua aplicabilidade, as falhas ocorrem desde a compreensão acerca da realidade da bacia até a capacitação dos tomadores de decisão.

O planejamento eficiente, considerando os usos múltiplos previstos na legislação, requer, no mínimo, dados de disponibilidade, demanda e qualidade de água.

Segundo a ODCE (2015), o cumprimento da legislação e a capacidade de monitoramento da água são variados entre os Estados brasileiros. O cumprimento das normas é um grande desafio e é muito influenciado por fatores culturais.

O grande número de pequenos usuários de água e a falta de uma cultura de conformidade com as regras contribuem para o problema, como também contribuem o uso limitado, o alto custo e as questões de manutenção associadas aos medidores de água (OCDE, 2015.p. 86).

No Brasil, perpetua-se a cultura da remediação. Primeiro ocorre o problema, depois corre-se atrás de alternativas para solucioná-los. Prevenir é sempre melhor que remediar, mas nem sempre é a solução mais acessível. Entretanto, à medida que o problema aumenta, aumentam os custos para resolvê-lo. Assim acontece, por exemplo, com as questões relacionadas ao saneamento ambiental. Devido à baixa qualidade das águas dos rios brasileiros, o custo para o tratamento de água e esgoto é alto.

“Segundo o Plano Nacional de Saneamento (PLANSAB), o valor necessário de recursos financeiros até 2033 para serviços de água e esgoto pode vir a representar 5.2% do PIB (Produto Interno Bruto). Sem previsão de financiamento e compromissos estáveis de longo prazo, a política de recursos hídricos não poderá ser implementada com êxito (OCDE, 2006. p. 71)”. São muitas as lacunas existentes para a obtenção de sucesso na implementação das políticas de recursos hídricos e planos de bacia: política, administrativa, financiamento, capacitação, objetivo, responsabilidade, informação e planejamento. Existem inúmeros planos no Brasil, mas são fracos por serem falhos no planejamento.

Os planos de recursos hídricos são ferramentas importantes na identificação das lacunas, implementação de estratégias, construção de consenso entre as partes interessadas, orientação e mensuração do progresso na realização das metas (OCDE, 2015). Daí a relevância do planejamento adequado. A integração entre a política de recursos hídricos e o ordenamento do território é dificultada devido às convergências e antagonismos entre as políticas públicas. O ciclo de planejamento territorial requer maior coordenação e coesão, maior atenção ao tempo e mais integração entre políticas setoriais que afetam a água, como agricultura, silvicultura, energia, saneamento e turismo. (SILVA

JÚNIOR et al. 2015). O Pacto Nacional pela Gestão das Águas e outros programas são boas oportunidades para promover a necessária integração intersetorial.

Este estudo mostrou que, para obter sucesso na implementação da política de recursos hídricos na BHRG, muita coisa deve ser repensada. A legislação deve ser seguida, mas, para isso, é necessário meio adequado para implementá-la. Este estudo complementa o diagnóstico de situação dos recursos hídricos, mas acreditamos que, para elaborar um plano eficiente e condizente com a realidade da bacia, o monitoramento adequado da água é primordial. A capacidade de monitorar e fazer cumprir a legislação precisa ser uma das considerações fundamentais para a alocação correta da água, incluindo a outorga de direitos de uso da água (OCDE, 2015). Na BHRG, por exemplo, a capacidade de monitorar e fazer cumprir a lei varia. Podemos verificar isto observando os indicadores de monitoramento e o de implementação dos instrumentos de gestão nas unidades de gestão hídrica.

A gestão integrada dos recursos hídricos é importante para o estabelecimento de instrumentos e mecanismos que evitem ou solucionem os conflitos de usos, possibilitando que todos usufruam, de forma sustentável, dos recursos hídricos (IPT, 2008. p. 48).

Diante disso, é possível afirmar que a BHRG avançou nas questões hídricas. Entretanto, para que a implementação da política de recursos hídricos e o plano de bacia tenha êxito, é preciso focar os problemas graves e recorrentes. Por meio deste estudo, verificamos que os principais problemas são o monitoramento das águas e o saneamento ambiental precário. Estes problemas têm origem, principalmente, na expansão urbana e agropecuária na bacia. É importante ressaltar que o diagnóstico de situação da BHRG desconsiderou a capacidade de suporte do solo. Isso pode agravar processos erosivos e comprometer os serviços ecossistêmicos prestados pela bacia. Evidenciou-se, também, a baixa proporção de vegetação nativa preservada. Vale ressaltar que a vegetação nativa, especialmente as Áreas de Preservação Permanente, exerce um papel fundamental na manutenção da qualidade e

disponibilidade de água. Falta sensibilização e fortalecimento dos atores locais, especialmente gestores municipais e estaduais, com relação às questões hídricas e ambientais. A sensibilização da população usuária a partir da educação ambiental é uma ferramenta importante. É necessária a participação e inserção da sociedade no contexto da bacia, especialmente em relação aos problemas hídricos e ambientais. Além disso, é necessário tratar as questões hídricas, sob os preceitos da sustentabilidade. Isso porque o desenvolvimento socioeconômico é totalmente dependente da disponibilidade, acessibilidade e qualidade dos recursos naturais.

#### **2.3.2.4 Conclusão**

A análise exploratória dos dados do diagnóstico de situação dos recursos hídricos da BHRG nos permitiu visualizar e compreender as similaridades e divergências na BHRG. Não só entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais, mas entre as unidades de gestão hídrica.

De um modo geral, as unidades de gestão com maiores proporções de áreas cultivadas apresentaram melhores Índices de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) e tendem a ser melhor estruturadas quanto ao monitoramento da água e saneamento ambiental. Entretanto, a precária infraestrutura desses segmentos tem prejudicado a qualidade da água e ameaçado a saúde da população.

A implementação dos instrumentos de gestão hídrica na BHRG está fortemente correlacionada com as questões de monitoramento da água.

As atividades agropecuárias e a urbanização são especialmente responsáveis pela alta geração de resíduos sólidos e esgoto sanitário na bacia.

Diante disso, reforçamos os problemas causados pela fragmentação entre as políticas públicas vigentes na BHRG. O desenvolvimento socioeconômico deve acontecer atrelado às responsabilidades com o meio ambiente. Tudo o que acontece na bacia hidrográfica impacta a jusante, tornando-a uma integradora natural dos usos múltiplos da água.

A análise de componentes principais selecionou 14 dos 33 indicadores utilizados no diagnóstico de situação dos recursos hídricos. O CP1 e CP2 explicaram 82.79% da variação dos dados, discretizaram os Estados de Minas Gerais e São Paulo e destacaram as principais características das unidades de gestão hídrica. A análise de agrupamento confirmou a ACP.

Dada a relevância do tema e sua interdisciplinaridade, torna-se necessário que os tomadores de decisão reconheçam a importância das políticas de recursos hídricos, além de vinculá-las às outras políticas de desenvolvimento. Só assim acreditamos na possibilidade de sucesso na implementação das políticas de recursos hídricos.

Reforçamos também a necessidade de tratar as questões hídricas sob os preceitos da sustentabilidade. Isso porque o desenvolvimento socioeconômico é totalmente dependente da disponibilidade, acessibilidade e qualidade dos recursos naturais.

Este estudo complementa o diagnóstico de situação de recursos hídricos, destacando as particularidades de cada unidade de gestão hídrica e os principais problemas que devem ser priorizados para melhorar a eficiência da gestão hídrica na BHRG. Apesar de termos importantes instrumentos de gestão previstos na legislação, na prática, é difícil implementá-los. Deve-se integrar o desenvolvimento socioeconômico com as questões hídricas, sensibilizar os tomadores de decisão e a população quanto à temática e ter uma equipe capacitada e interdisciplinar para auxiliar no gerenciamento das águas.

### **3 AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE SUSTENTABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRANDE EM DIFERENTES ESCALAS**

O Capítulo 3 apresenta a condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da Bacia do Rio Grande em diferentes escalas abordando diferentes métodos. Assim, o capítulo foi dividido em três subcapítulos, em formato de artigos científicos, para facilitar a compreensão: (1) Sustentabilidade dos Recursos Hídricos da BHRG baseada no Barômetro de Sustentabilidade, (2) Aplicação da Informação Entrópica para Avaliar a Condição de Sustentabilidade do Setor de Saneamento e (3) Sustentabilidade dos Recursos Hídricos em Escala Municipal baseada no Barômetro de Sustentabilidade e Entropia da Informação.

#### **3.1 Sustentabilidade dos recursos hídricos da Bacia do Rio Grande, Brasil: uma abordagem baseada no barômetro da sustentabilidade<sup>6</sup>**

##### **3.1.1 Introdução**

A construção de um futuro sustentável para as novas gerações é uma meta essencial para o planejamento e o manejo de recursos naturais, além de ser um dos grandes desafios do século XXI (CAMPOS; RIBEIRO; VIEIRA, 2014; GRAYMORE; SIPE; RICKSON, 2008). Isso requer um desenvolvimento que “atenda às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender as suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1987).

A sustentabilidade compreende “três pilares” ou “três dimensões” - ambiente, economia e sociedade. No entanto, suas inter-relações, nomeadas quanto ao grau de substituíbilidade entre capital natural e humano, têm estado no centro

---

<sup>6</sup> Subcapítulo baseado no artigo: GUIDOLINI, J.F.; GIAROLLA, A.; TOLEDO, P.M.; VALERA, C.A.; OMETTO, J.P.H.B. Water Sustainability at the River Grande Basin, Brazil: An Approach Based on the Barometer of Sustainability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, 2582, 2018.

do debate sobre a “sustentabilidade fraca” versus “sustentabilidade forte” (HUANG; WU; YAN; 2015). Para a “sustentabilidade fraca”, o capital cresce quase ilimitadamente. Isso porque acredita que o capital produzido e capital natural podem facilmente substituir um ao outro. Já a “sustentabilidade forte” considera limitada a substituíbilidade entre capital produzido e capital natural (MUELLER., 2005).

O conceito tradicional de gestão de recursos hídricos não atende aos requisitos de gestão para o desenvolvimento sustentável porque considera os recursos hídricos um “setor” da administração pública. Além disso, acredita que a água é antagonista aos setores que utilizam os recursos hídricos, tais como: agricultura, indústria, transporte, saneamento básico e geração de eletricidade. Devido aos seus múltiplos usos, a água transpõe todos esses setores especializados, além de ser fundamental para a população que dela usufrui.

Diante disso, a gestão integrada da água visa garantir a preservação, uso consciente, recuperação e conservação da qualidade dos recursos hídricos para os seus múltiplos usuários, de forma consistente efetiva com o desenvolvimento sustentável (YASSUDA, 1993). A área de recursos hídricos exige que os gestores tomem decisões perante um sistema altamente complexo e incerto (CHONG; BACH, 2017). Assim, os pesquisadores e formuladores de políticas públicas defendem a sustentabilidade como a melhor abordagem para solucionar problemas atuais e futuros relacionados com a água. Para esta abordagem, a integração entre a conservação do ecossistema e os aspectos sociais, econômicos, institucionais e ambientais em um único sistema torna-se necessária (XIONG; WU; WU; LU, 2012). A bacia hidrográfica é uma unidade natural ou sistema único que permite essa integração (GUIDOLINI et al., 2018a; TUNDISI, 2008).

Mensurar a sustentabilidade é um trabalho interdisciplinar e complexo (GUIDOLINI et al., 2018a) e os indicadores são ferramentas poderosas para avaliar o progresso rumo ao desenvolvimento sustentável (PIRES et al., 2017). O trabalho com indicadores é fortemente recomendado por pesquisadores (BOLCÁROVÁ; KOLOTTA, 2015; CORNESCU; ADAM, 2014; MOLDAN;

JANOŮKOVÁ; HÁK., 2012), tomadores de decisão e instituições internacionais (OECD, 2015). A utilização de indicadores relacionados à água pode contribuir não só para melhorar a alocação de água (PIRES et al., 2017) e gestão hídrica (GUIDOLINI et al., 2018a), mas também para subsidiar formulações de políticas públicas (GRAYMORE; SIPE; RICKSON, 2008). No entanto, existem limitações recorrentes em trabalhos com indicadores, como escala de trabalho, disponibilidade de dados, frequência e viabilidade da coleta de dados, entre outros. Essas limitações podem inviabilizar pesquisas de sustentabilidade.

As metodologias de análise da sustentabilidade devem ser flexíveis (especialmente em relação à escolha dos indicadores), aplicáveis em diferentes escalas de trabalho, e possuir didática em relação à apresentação dos resultados. Além disso, devem possibilitar o monitoramento e fornecer informações que podem orientar tomadas de decisão e desenvolvimento de políticas necessárias para a comunidade e governança regional da água (GRAYMORE; SIPE; RICKSON, 2008). A questão dos recursos hídricos é fundamental para o desenvolvimento social e econômico de um país (SUN et al., 2018). Portanto, estudos de sustentabilidade dos recursos hídricos são considerados urgentes.

Rodrigues e Rippel (2015) sintetizaram alguns métodos de análise da sustentabilidade, entre eles: Pegada Ecológica (1993), o Barômetro da Sustentabilidade (1997) e o Painel de Sustentabilidade (1999). Estas técnicas são vantajosas porque são facilmente aplicáveis e compreendidas, auxiliam em tomadas de decisão e fornecem informações específicas sobre as condições de sustentabilidade. No entanto, os autores apontam as desvantagens de cada método. A Pegada Ecológica é um método estático e não se aproxima das dimensões sociais e econômicas, enquanto o Barômetro da Sustentabilidade pode ser subjetivo durante o processo de elaboração da escala de desempenho dos indicadores. O Painel de Sustentabilidade é complexo, sobre o âmbito da interação entre as dimensões econômicas, sociais, ambientais e institucionais. Quanto aos índices abrangentes de recursos hídricos, as abordagens mais comuns são: *Water Poverty Index* (WPI), *Integrated Water*

*Stress Index, Water Scarcity or Shortage Index, Water Resources Carrying Capacity Index, Water Security Index e Human-Water Harmony Index.* Todos esses índices são constituídos por um sistema de indicadores fixo (BAO; ZOU, 2018).

O Barômetro de Sustentabilidade (BS) pode ser usado como uma ferramenta de comunicação e reflexão sobre o significado de bem-estar humano e bem-estar ambiental, suas inter-relações e a importância de ambos para o desenvolvimento sustentável. As diferenças e semelhanças entre a percepção da população e os dados convencionais podem se tornar aparentes. Isso viabiliza o diálogo entre gestores, cientistas e sociedade a fim de alcançar um entendimento comum sobre o problema abordado (PRESCOTT-ALLEN., 1997). Uma das vantagens do BS é a sua abordagem holística, alcançada a partir da integração entre o bem-estar humano e o bem-estar ambiental. O bem-estar humano e o bem-estar ambiental são combinados oportunamente, buscando preservar as informações do processo de análise. O declínio de um índice não impossibilita o crescimento do outro; isso é particularmente importante no âmbito geral da análise (PRESCOTT-ALLEN, 1997). Cálculos podem ser complexos e devem ser realizados mediante determinados objetivos e padrões. Assim, o BS utiliza uma escala em porcentagem para medir o desempenho de índices e indicadores. Isso possibilita a comparação de dados e apresentação gráfica (BOSSEL, 1999). A escala de desempenho é considerada extremamente subjetiva por muitos autores (VAN BELLEN, 2004). Contudo, esse tipo de escala não é mais ou menos subjetiva do que qualquer outro método de mensuração de sustentabilidade em uso. Além disso, a principal vantagem do BS é a transparência na elaboração da escala de desempenho em comparação aos outros métodos. No BS, medidas de escala de desempenho consideradas boas ou inaceitáveis devem ser explicitamente definidas (PRESCOTT-ALLEN, 1997). Além disso, o BS pode ser aplicado de escala local à global, permite o monitoramento e comparações espaço-temporais, subsidia tomadas de decisão com base na identificação de áreas prioritárias (ARAÚJO et al., 2013; CARDOSO; TOLEDO; VIEIRA., 2016;

KRONEMBERGER; CARVALHO; JUNIOR, 2004; ) e aumenta a compreensão sobre as relações entre os seres humanos e o ambiente (VAN BELLEN, 2004).

Embora seja viável nas mais diversas escalas de trabalho, há poucas análises de sustentabilidade em bacias hidrográficas na literatura científica utilizando a ferramenta BS. No Brasil, a ferramenta BS foi aplicada para a bacia hidrográfica de Jurumirim, no Rio de Janeiro, Brasil (KRONEMBERGER; CARVALHO; JUNIOR., 2004). No geral, o BS é aplicado nas escalas municipal e estadual, com maior frequência (ARAÚJO et al., 2013; CARDOSO; TOLEDO; VIEIRA., 2016).

A Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL,1997) prevê que o primeiro passo para a gestão integrada de uma bacia hidrográfica é a realização de um diagnóstico de situação dos recursos hídricos. Este passo é importante porque ajuda os gestores a conhecer e compreender as condições atuais da bacia e facilita a identificação e priorização dos principais problemas (GWP, 2004). O diagnóstico de situação da BHRG foi elaborado usando o método FMPEIR (Força Motriz-Pressão-Estado-Impacto-Resposta). Esse método, em gestão de águas, analisa a situação da água e determina a capacidade que as variáveis sociais, econômicas, institucionais e ambientais têm de alterar o estado da água na bacia (IPT, 2008).

A objeção mais séria a essa abordagem sobre os indicadores é que essa metodologia negligencia a natureza dinâmica dos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica (BOSSEL, 1999; MARZAL; ALMEIDA, 2000). O modelo FMPEIR é baseado em probabilidade e considera o efeito uma função da causa. Ou seja, desconsidera a interação entre as variáveis analisadas. Desconsiderar a interação entre as variáveis pode ocasionar erros na elaboração de políticas institucionais e interpretação muito simplificada das inter-relações entre as variáveis a serem mensuradas (GALLOPIN, 1997; PINTÉR; HARDI; BARTELMUS, 2005).

Nesse contexto, este estudo objetivou avaliar a condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da BHRG, Brasil, previamente à implementação do Plano Integrado de Recursos (PIRH), sob a abordagem do Barômetro de

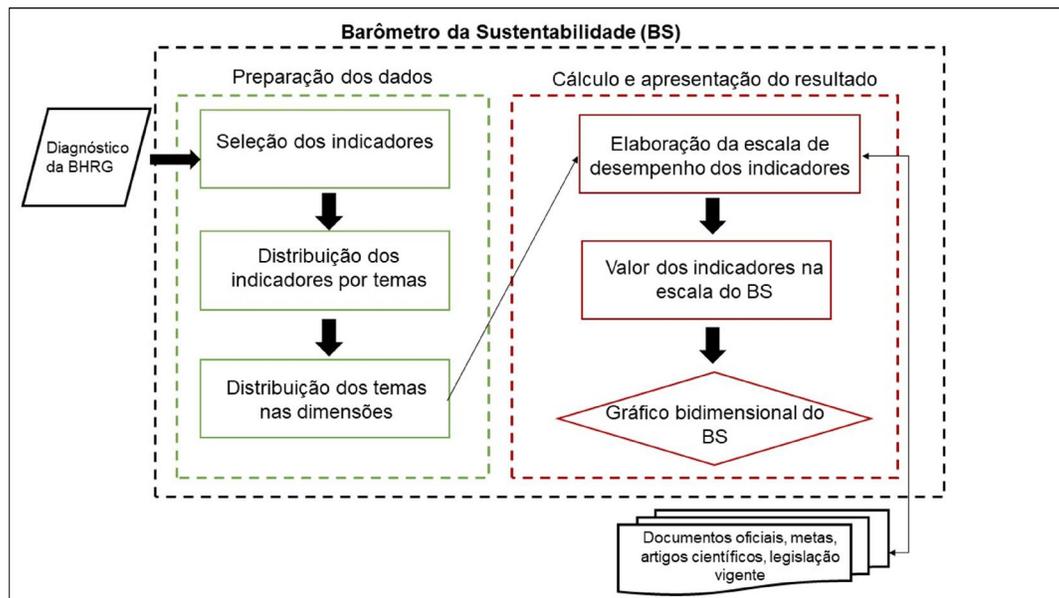
Sustentabilidade (BS). Além disso, procuramos não só compreender as inter-relações humanas e ambientais, mas também determinar áreas temáticas prioritárias, que demandam ações ou intervenções urgentes dos gestores e da sociedade. Este estudo pode auxiliar no monitoramento espaço-temporal do PIRH, após sua implementação, porque utilizamos indicadores do diagnóstico de situação de recursos hídricos. Os resultados foram discutidos sob os preceitos da sustentabilidade, integrando variáveis ambientais, econômicas e sociais.

### 3.1.2 Material e métodos

#### 3.1.2.1 Seleção e organização dos indicadores

O delineamento da pesquisa é apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Delineamento da pesquisa.

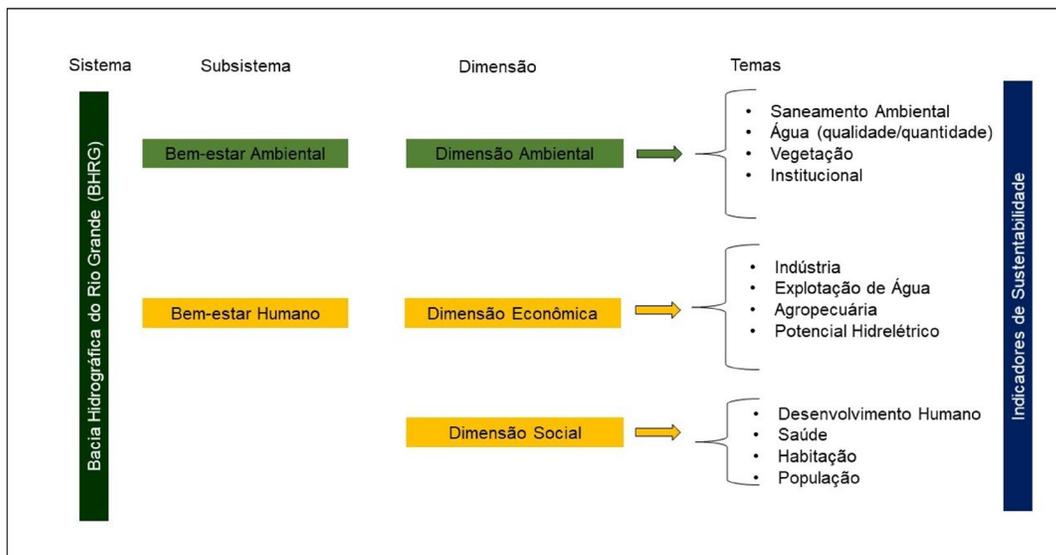


Primeiramente, foram selecionados os indicadores de sustentabilidade a partir do diagnóstico de situação dos recursos hídricos da Bacia do Rio Grande. Este documento oficial foi publicado em 2008 pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e o ano de referência dos dados é 2000 (IPT, 2008). A seleção dos indicadores baseou-se neste documento

oficial porque os dados foram expressos em escala de bacia hidrográfica e separados por UGH (unidades de gestão hídrica), que são os objetos de interesse deste estudo. Selecionamos 21 indicadores de sustentabilidade e o principal critério utilizado foi a disponibilidade de dados. Os dados utilizados nesta pesquisa estavam disponíveis tanto para o Estado de Minas Gerais quanto para o Estado de São Paulo.

Após a seleção, os indicadores foram distribuídos por temas e, posteriormente, por dimensões de desenvolvimento sustentável (ambiental, econômica e social). O subsistema “bem-estar humano” consistiu na junção das dimensões social e econômica. Já o subsistema “bem-estar ambiental” constituiu-se da dimensão ambiental (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Organização dos indicadores por tema, dimensão e subsistema.



### 3.1.2.2 Elaboração da escala de desempenho dos indicadores selecionados

A construção da escala de desempenho considerou a pressão que as variáveis ambientais, sociais e econômicas exercem sobre os recursos hídricos da BHRG. A escala BS é dividida em cinco faixas, categorizadas de insustentável

a sustentável. A escala de desempenho funciona de maneira semelhante. No entanto, os valores são representados pelos padrões estabelecidos em nível local, nacional ou mundial e baseiam-se em literatura científica, legislações vigentes, documentos oficiais da bacia ou representação de “metas a serem alcançadas” (KRONEMBERGER; CARVALHO; JUNIOR, 2004). Assim, é possível usar a escala de desempenho para avaliar a situação do indicador em relação à referência (documentos oficiais, literatura científica, metas, legislação vigente) e possibilitar o monitoramento espaço-temporal do progresso ou retrocesso em direção ao desenvolvimento sustentável. Referências e descrições dos indicadores selecionados (separados por dimensão e tema) são apresentadas nas Tabelas A2 a A4.

Os limiares dos intervalos da escala de desempenho foram definidos a partir do valor de referência. Esses limiares correspondem a valores que variam de 0 a 100 na escala BS, apontando para as condições de sustentabilidade: sustentável (81-100), potencialmente sustentável (61-80), intermediário (41-60), potencialmente insustentável (21-40) e insustentável (0-20) (PRESCOTT-ALLEN, 1997).

Os indicadores podem apresentar escala crescente ou decrescente de desempenho. Para indicadores com escala de desempenho crescente, o maior valor representa o melhor desempenho. Um exemplo de indicador com escala crescente é "proporção dos municípios com aterro sanitário". Em contrapartida, para os indicadores com escala decrescente, o valor mais baixo indica o melhor desempenho. Um exemplo de um indicador com escala decrescente é "número anual de registros de hospitalização por doenças de veiculação hídrica". Os valores reais dos indicadores são mostrados nas Tabelas A5 e A6 para Minas Gerais e São Paulo, respectivamente. As escalas de desempenho dos indicadores associadas à escala do Barômetro de Sustentabilidade podem ser observadas na Tabela A7.

### 3.1.2.3 Atribuição de valores aos indicadores na escala do BS

Após a elaboração da escala de desempenho dos indicadores, os valores reais dos indicadores foram transpostos para a escala do BS por interpolação linear simples. Em seguida, foi calculada a média aritmética do nível hierárquico mais baixo para o mais alto: indicador para o tema, tema para dimensão e dimensão para o subsistema. O valor do indicador na escala do BS é calculado a partir da equação (3.1):

$$BSx = \left[ \left| \frac{(DLa-DLx) \times (BSa-BSp)}{(DLa-DLp)} \right| \times (-1) \right] + BSa \quad (3.1)$$

Em que:

BSx = valor na escala do BS.

DLa = limite anterior do intervalo que contém X na escala de desempenho.

DLx = valor real do indicador.

BSa = limite anterior ao intervalo que contém X na escala do barômetro.

BSp = limite posterior ao intervalo que contém X na escala do barômetro.

DLp = limite posterior ao intervalo que contém X na escala de desempenho.

A condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da BHRG e suas respectivas UGHs é apresentada em um gráfico bidimensional, em que o eixo X refere-se ao bem-estar ambiental e o eixo Y refere-se ao bem-estar humano (PRESCOTT-ALLEN, 1997).

Os índices complementares ESI (*Environmental Stress Index*) e WSI (*Well-being / Stress Index*) foram calculados a partir dos resultados do BS. Esses índices adicionais de avaliação ajudam a compreendermos melhor a relação entre o bem-estar humano e o estresse ambiental (VAN BELLEN, 2004).

O ESI representa a porcentagem residual em direção à situação de desenvolvimento ideal sob os preceitos de sustentabilidade. Quanto maior esse

percentual, maior o estresse sofrido pelo ambiente. Este índice é calculado da seguinte forma:

$$ESI = 100 - EWI \quad (3.2)$$

Em que:

EWI = Índice de Bem-Estar Ambiental (calculado a partir do Barômetro de Sustentabilidade), composto pelo resultado do subsistema "bem-estar ambiental".

O WSI (Índice de bem-estar / estresse) retrata o custo do bem-estar humano para o meio ambiente. O WSI é calculado da seguinte forma:

$$WSI = HWI \div ESI \quad (3.3)$$

Em que:

HWI = Índice de Bem-Estar Humano (calculado por meio do Barômetro de Sustentabilidade), compreendendo os resultados do subsistema "bem-estar humano".

ESI = Índice de Estresse Ambiental

Altos valores para HWI e WSI próximo a 1 indicam um alto custo ambiental para a manutenção do bem-estar humano. Baixo HWI e WSI próximo a 1 indicam uma situação socialmente precária e baixa exploração ambiental. Idealmente, o WSI é  $> 1$ , com alto bem-estar humano e baixo estresse ambiental. Em geral, esses índices complementares estão relacionados ao nível de estresse sofrido pelo ambiente para manter o bem-estar humano.

Por fim, as áreas prioritárias foram calculadas pela Equação 3.4. As médias de cada tema foram calculadas para Minas Gerais e São Paulo, com base nos valores obtidos na escala do BS, e apresentadas em um gráfico hierárquico. Os

valores mais altos (apresentados em tons mais escuros) representaram as áreas temáticas mais críticas, ou seja, que demandam ações ou intervenções urgentes dos gestores e da sociedade.

$$AP = 100 - BSMt \quad (3.4)$$

Em que:

AP = área temática prioritária

BSMt = valor médio do tema na escala BS.

### **3.1.2.4 Resultados e discussão**

#### **3.1.2.4.1 Condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da BHRG**

As ferramentas de análise de sustentabilidade desempenham um importante papel na integração das dimensões do desenvolvimento sustentável, facilitando os processos de planejamento e apoiando tomadas de decisão. As Figuras 3.3 e 3.4 mostram o gráfico bidimensional do BS para Minas Gerais e São Paulo, respectivamente.

Figura 3.3 – Gráfico bidimensional representando a condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da BHRG para o Estado de Minas Gerais.

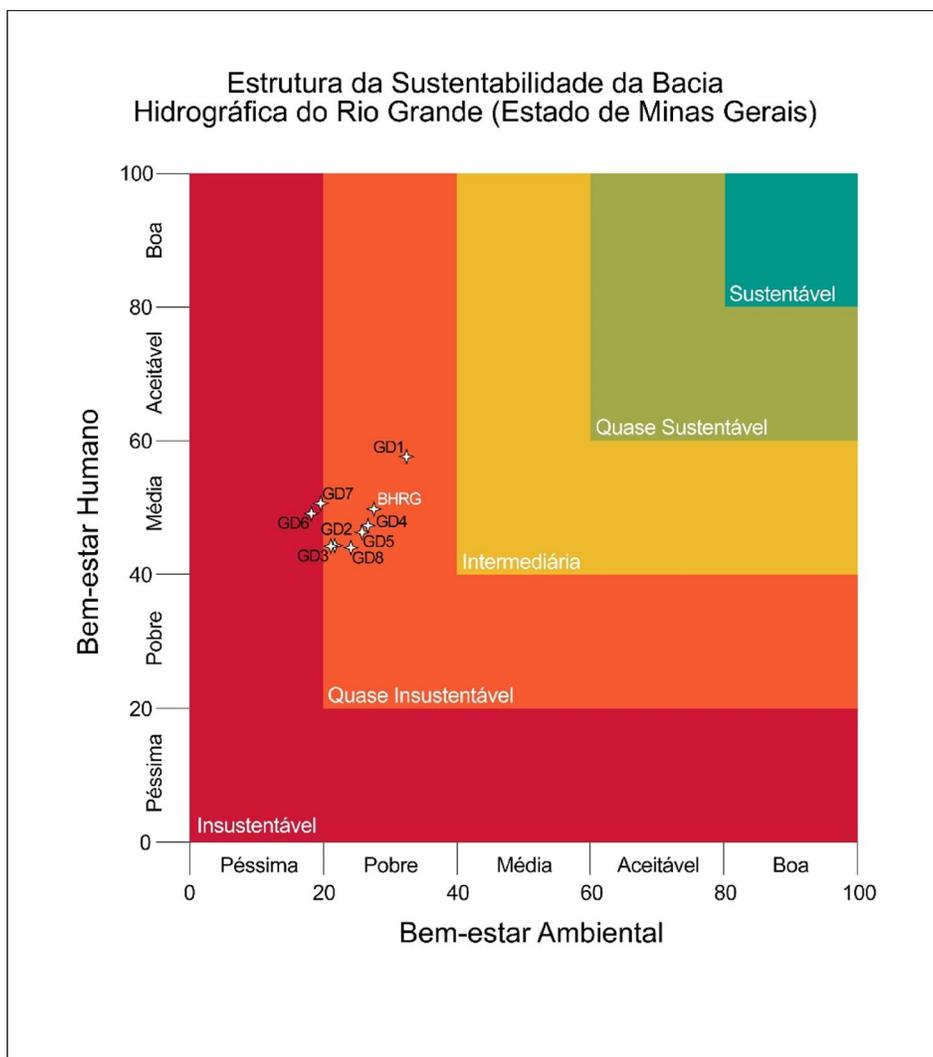
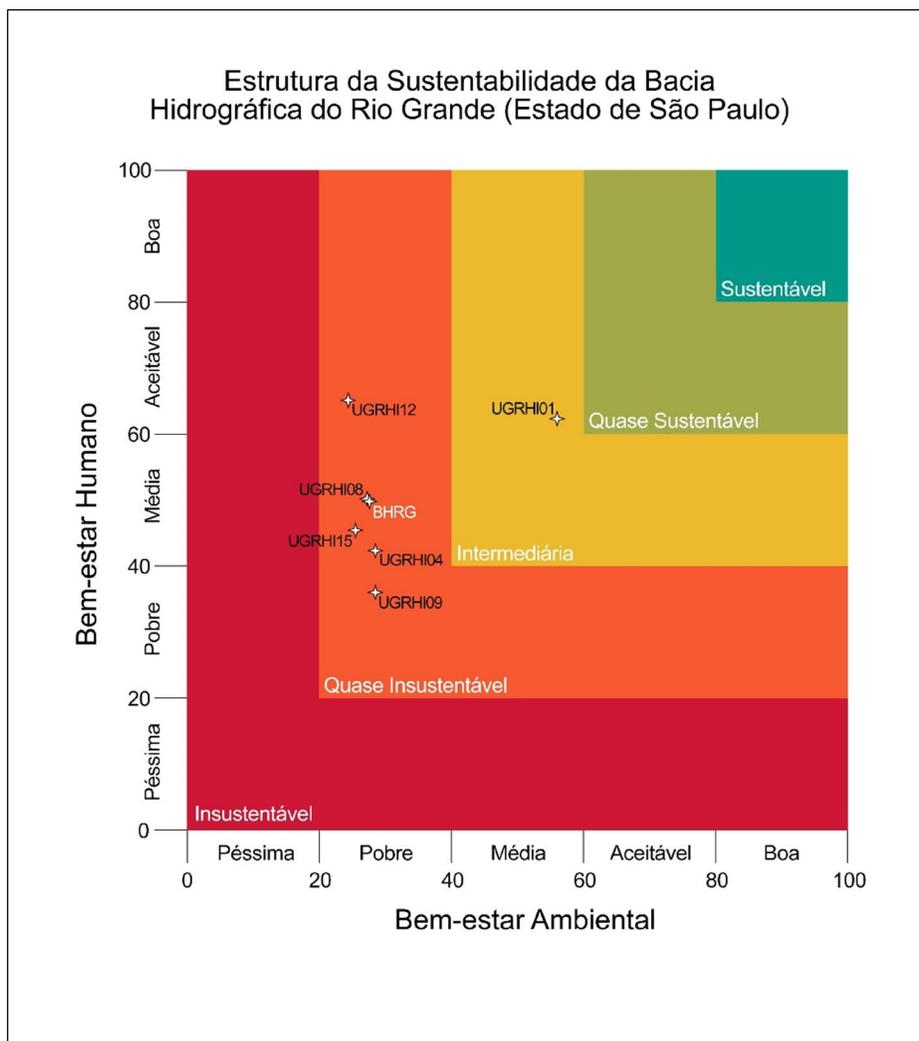


Figura 3.4 - Gráfico bidimensional representando a condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da BHRG, para o Estado de São Paulo.



A BHRG era “quase insustentável”, com um valor de 27,63 (“pobre”) para o bem-estar ambiental e de 49,79 (“média”) para o bem-estar humano. Houve diferenças consideráveis entre as UGHs de Minas Gerais e São Paulo.

Com relação ao bem-estar humano, todas as UGHs em Minas Gerais apresentaram condição de sustentabilidade “média”. Por outro lado, as unidades de gestão hídrica UGRHI01 e UGRHI12, em São Paulo, alcançaram condição de sustentabilidade “aceitável” e a UGRHI09 “pobre”. O tema determinante para a obtenção desses resultados foi a “saúde”, representada pelo número de pessoas hospitalizadas por doenças de veiculação hídrica na

BHRG. Em relação ao bem-estar ambiental, todas as UGHs apresentaram condição “ruim”, exceto a GD6 e GD7, em Minas Gerais, classificadas com condição de sustentabilidade “péssima”.

A UGRHI01, em São Paulo, foi a única UGH que atingiu uma condição “intermediária” de sustentabilidade na BHRG. O tema “vegetação”, representado pelas unidades de conservação e preservação da vegetação nativa, contribuiu muito para esse resultado. A dimensão ambiental foi decisiva para a obtenção da condição “quase insustentável” da BHRG, evidenciando o desequilíbrio entre o desenvolvimento socioeconômico e a qualidade ambiental. O desenvolvimento socioeconômico e o dos recursos hídricos não podem ser dissociados da conservação ambiental porque, em essência, envolvem a sustentabilidade humana no ambiente natural (TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T, 2011)

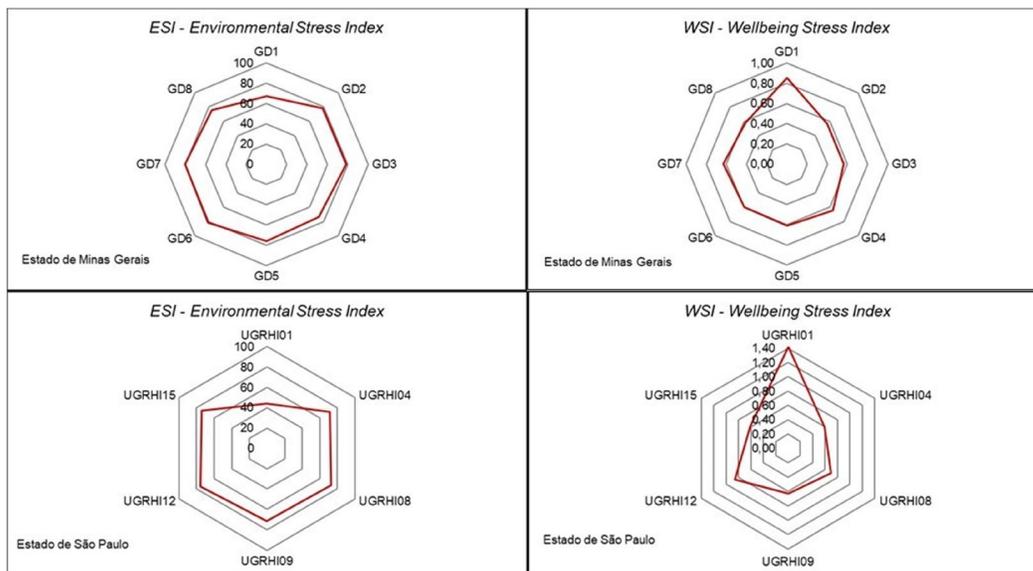
A ferramenta BS foi aplicada para a Bacia de Jurumirim, em Angra dos Reis (Rio de Janeiro - Brasil). A bacia apresentou condição “intermediária” de sustentabilidade. Contrariamente à BHRG, a bacia de Jurumirim apresentou condição “quase sustentável” para o bem-estar ambiental e “intermediária” para o bem-estar humano (KRONENBERGER; CARVALHO; JUNIOR, 2004). No entanto, é importante destacar que a comparação espaço-temporal entre os resultados obtidos pelo BS entre áreas de estudo diferentes só é possível se o sistema de indicadores e respectivas escalas de desempenho forem os mesmos, assim como o período de análise.

#### **3.1.2.4.2 Relação entre o bem-estar humano e o ambiente**

Uma forma de compreender a relação que existe entre o meio ambiente e o bem-estar humano é analisar as condições ambientais que são capazes de interferir na qualidade de vida da população (EVANS e COHENS, 1987). O Índice de Estresse Ambiental (ESI) e o Índice de Bem-Estar/Estresse (WSI) aumentaram a compreensão sobre a relação entre bem-estar humano e estresse ambiental na BHRG. A Figura 3.5 apresenta os valores de ESI e WSI na BRHG para Minas Gerais e São Paulo. Em Minas Gerais, os altos valores

percentuais do ESI (67,46–81,75%) demonstraram alto estresse ambiental. Os valores do WSI inferiores a 1 (0,56–0,85), aliados a altos valores de ESI, demonstraram que o desenvolvimento socioeconômico gerou altos custos ambientais. O mesmo foi observado para São Paulo, onde as altas porcentagens de ESI (71,51–75,56%) e baixos valores de WSI (0,59–0,86) caracterizaram elevado estresse ambiental em função do bem-estar humano. A exceção aconteceu para a UGRHI01, que apresentou o menor percentual de estresse ambiental (43,96%) e um WSI maior que 1 (1,42). Portanto, a UGRHI01 é a única UGH que não causou alto estresse ambiental para manter bem-estar humano. Isso aconteceu, especialmente, pelo fato de apresentar o maior percentual de vegetação nativa preservada (51,7%), a menor população e a menor exploração econômica.

Figura 3.5 – Environmental Stress Index e Well-being Stress Index para a BHRG.



Menos de 15% da vegetação nativa era preservada no BHRG. O aumento da urbanização e de atividades agropecuárias e industriais aumentou a demanda por água e energia e, conseqüentemente, elevou a geração de esgotos, efluentes e resíduos sólidos. No entanto, o saneamento ambiental e o monitoramento da água eram precários e não acompanhavam o

desenvolvimento socioeconômico regional. Além disso, menos de 20% da extensão do Rio Grande tinha a qualidade de água monitorada. Concomitantemente, o número médio de pessoas hospitalizadas por doenças veiculação hídrica foi de 1.234 na BHRG para o período analisado.

Apesar da proporção razoável de municípios ligados às redes de abastecimento de água e coleta de esgoto, a proporção dos municípios que destinava os seus resíduos ao aterro sanitário e tratava o esgoto produzido era baixa. Se incluíssemos a perda na distribuição de água, eficiência de tratamento de água e esgoto e a qualidade dos aterros sanitários nessa discussão, o impacto negativo sobre os recursos hídricos na BHRG seria consideravelmente maior. Além disso, os problemas de estresse e escassez de água devido às mudanças ambientais globais e a falta de articulação e ações consistentes em relação à governança dos recursos hídricos agravam a crise hídrica (TUNDISI, 2008). As consequências disso são o aumento das fontes de contaminação, a redução da disponibilidade hídrica e a dificuldade de acesso à água potável, o que pode causar prejuízos à saúde da população.

#### **3.1.2.4.3 Áreas prioritárias na BHRG**

A aplicação do BS possibilitou a identificação de áreas temáticas prioritárias, que exigem maior atenção dos gestores e da sociedade. Conhecer as áreas temáticas que demandam maior atenção subsidia o planejamento de ações ou intervenções, aumentando a efetividade da gestão e política de recursos hídricos (GUIDOLINI et al., 2018a). Além disso, pode fornecer referências para a formulação de políticas públicas (BAO; ZOU, 2018). A Figura 3.6 mostra as áreas temáticas prioritárias da BHRG para Minas Gerais e São Paulo, separadas por dimensão do desenvolvimento sustentável. Os resultados médios de cada área temática foram obtidos para os dois Estados a partir dos resultados encontrados no BS (Figura 3.7). Em Minas Gerais, as áreas temáticas “vegetação” e “institucional” foram as mais prioritárias, seguidas pela agricultura, geração de energia, índice de desenvolvimento humano municipal e saúde. Em São Paulo, destacaram-se como prioritárias as áreas temáticas

“vegetação” e “qualidade / quantidade de água”, seguidas por “indústria”, “agricultura”, “saúde” e “crescimento populacional”. A recuperação da vegetação nativa na BHRG é essencial para reduzir o estresse ambiental e melhorar o bem-estar ambiental. Com menos de 15% de vegetação nativa preservada, a BHRG está inserida nos biomas Mata Atlântica e Cerrado. O tipo de cobertura vegetal influencia o comportamento hidrológico e modifica os atributos físicos e químicos do solo. A remoção de florestas nativas contribui para o aumento de áreas degradadas, interfere negativamente no movimento da água no solo e causa perdas de biodiversidade. Preservar ou recuperar a vegetação nativa é fundamental para a produção e conservação de fontes de água, porque intercepta a água da chuva, proporciona condições de infiltração e reduz o escoamento (BUENO; GALBIATTI; BORGES, 2005; VALERA et al., 2017). O ciclo de planejamento territorial requer maior coordenação, coesão e integração de políticas públicas setoriais. Ou seja, é necessária a articulação e integração entre políticas públicas referentes a setores da administração pública que interferem nos recursos hídricos como: agricultura, indústria, silvicultura, energia e saneamento ambiental, por exemplo (BUENO; GALBIATTI; BORGES, 2005). A política nacional de recursos hídricos foi elaborada separadamente da gestão ambiental e territorial. Isso ocasionou a fragmentação da gestão hídrica no Brasil (WESCOAT, 2015). Além disso, a falta de estudos sobre a relação entre essas políticas, os antagonismos e as sobreposições existentes entre elas dificultam a unificação do conhecimento sobre a temática (GUIDOLINI et al., 2018a). A necessidade de abordagens holísticas tem sido cada vez mais citada para compreender sistemas complexos e aspectos interconectados da gestão (processo geral de tomadas de decisão) e governança da água (conjunto de regras e práticas para alcançar a gestão da água) (MEGDAL; EDEN; SHAMIR, 2017). Integrar e otimizar os múltiplos usos da água, alocando-a de forma correta e investindo em saneamento ambiental, é uma das formas mais eficientes de alcançar a sustentabilidade do desenvolvimento, pois melhora a qualidade de vida, gera emprego e renda e aumenta a capacidade de abastecimento de água (TUNDISI, 2008).

Figura 3.6 – Hierarquia das áreas temáticas prioritárias, separadas por dimensão e por Estado. Os tons mais escuros e o sentido da seta indicam a área temática e a dimensão mais vulnerável, respectivamente.

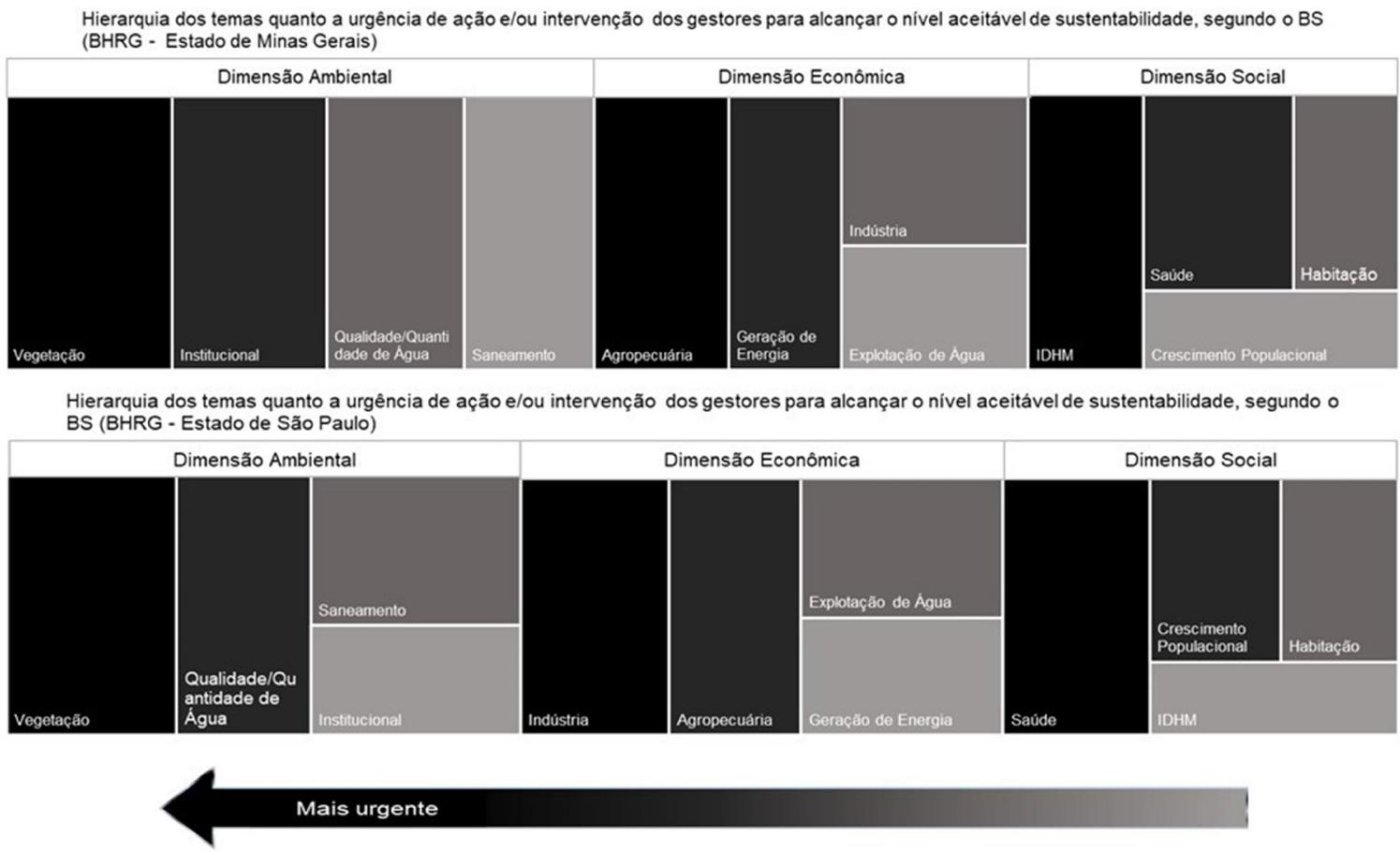
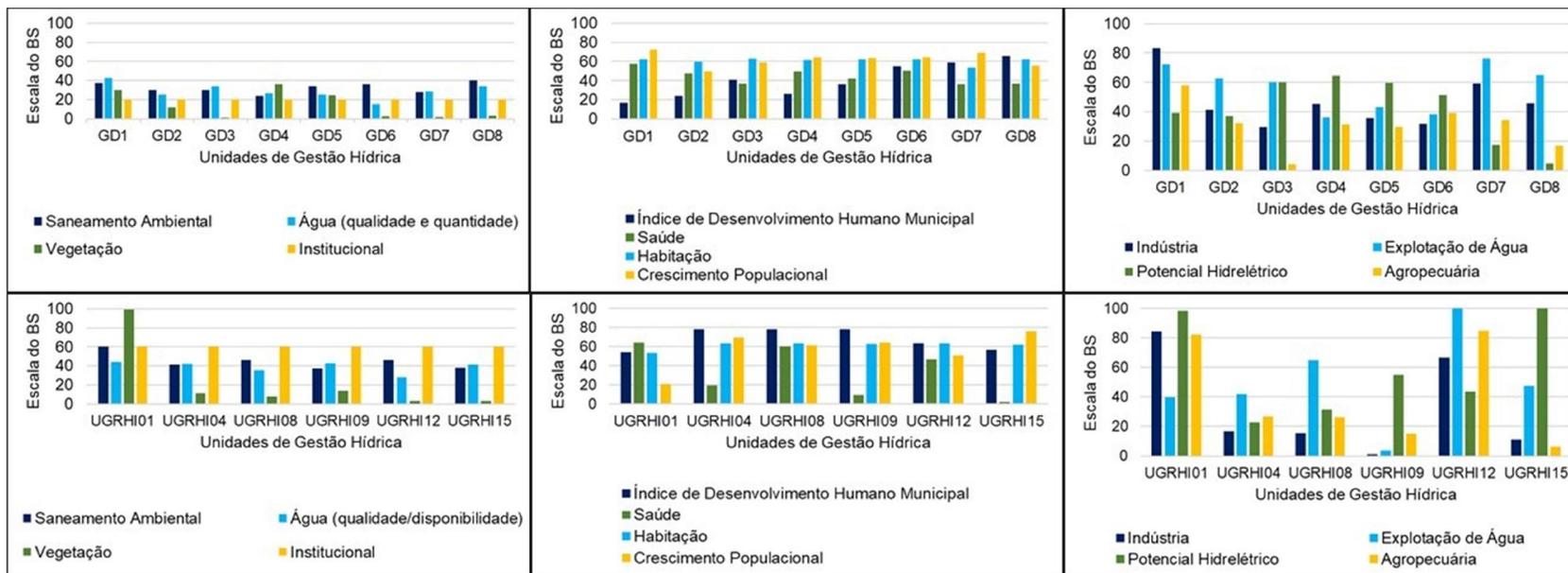


Figura 3.7 – Valores dos temas na escala do BS para os estados de Minas Gerais e São Paulo.



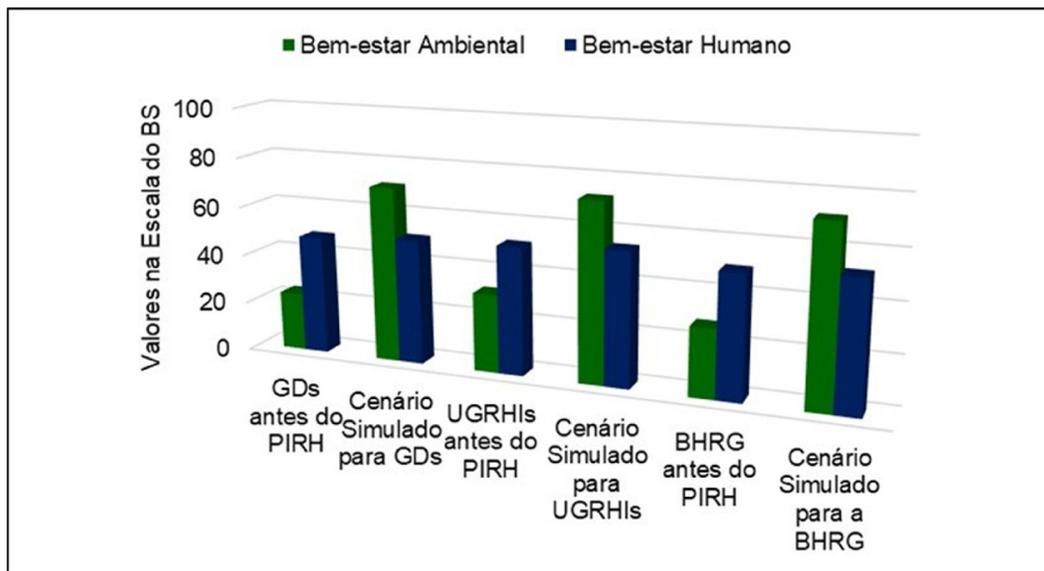
Pensando nisso, é possível criar um cenário hipotético, baseado nos resultados do BS, considerando que:

A dimensão econômica permanecerá inalterada:

- 1) Os temas vegetação, saneamento ambiental e monitoramento da água atingirão os valores mínimos para alcançar condição de sustentabilidade “aceitável” na escala do BS (valor = 61).
- 2) O tema institucional alcançará o valor máximo na escala BS (valor = 100).
- 3) O tema habitação, pertencente à dimensão social, atingirá o valor mínimo aceitável na escala BS (valor = 61).

O gráfico referente à simulação deste cenário é apresentado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – GDs (Unidades de Gestão Hídrica de Minas Gerais), UGRHIs (Unidades de Gestão Hídrica de São Paulo) e PIRH (Plano Integrado de Recursos Hídricos). Cenário simulado para a BHRG com a dimensão econômica inalterada. Mudanças na dimensão social (área temática: habitação) e na dimensão ambiental (todas as áreas temáticas foram consideradas). Este cenário consiste na implementação de todos os instrumentos de gestão hídrica e em alcançar condição “aceitável” para o saneamento ambiental, monitoramento da água e vegetação nativa). Consideraram-se os valores médios na escala do BS para todas as UGHs.



Os resultados indicaram que, se ocorrerem as mudanças estabelecidas, a BHRG apresentará condição aceitável de sustentabilidade. Considerando as

alterações, o valor médio final na escala do BS para a BHRG seria de 61,9 (nível aceitável). O subsistema bem-estar ambiental (27,63) e o bem-estar humano (49,79) avançariam para 71,55 e 52,26 na escala do BS, respectivamente. Assim, é possível afirmar que os recursos hídricos da BHRG só atingirão um nível “aceitável” de sustentabilidade se houver redução do estresse ambiental. Neste cenário, consideramos inalterada a dimensão econômica, o que não significa impedir o seu desenvolvimento. Entretanto, é de suma importância que esse desenvolvimento aconteça de forma equilibrada, considerando os aspectos sociais, institucionais e ambientais envolvidos. Vale ressaltar que gestão e governança sustentável da água compreendem políticas e ações justas e igualitárias, considerando os interesses de todos os usuários do recurso hídrico (MEGDAL; EDEN; SHAMIR, 2017). Desta forma, é importante frisar que (1) o cenário “ideal” é aquele em que todas as dimensões do desenvolvimento sustentável alcançam nível aceitável de sustentabilidade e (2) a melhora de indicador ou tema não implica mudanças iguais em toda as UGHs.

A ferramenta BS integrou as dimensões social, ambiental e econômica, identificando as áreas temáticas prioritárias da BHRG, podendo referenciar políticas públicas, auxiliar no planejamento e aumentar a efetividade da gestão dos recursos hídricos.

Os resultados deste estudo podem diferir ao aplicar outros métodos de análise de sustentabilidade ou outro sistema de indicadores. A ferramenta BS é flexível quanto à escolha de indicadores e a escala de desempenho, elaborada por analistas, pode variar. No entanto, flexibilidade e transparência são as principais vantagens do BS. Quando o método de análise de sustentabilidade apresenta um sistema fixo de indicadores, o analista é totalmente dependente da disponibilidade de dados específicos. Isto é, se um indicador é indisponível para a área de estudo, a análise será inviabilizada. A subjetividade na criação da escala de desempenho do BS pode interferir na condição de sustentabilidade da área de estudo. No entanto, o uso de métodos objetivos de ponderação para os indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável pode reduzir a subjetividade da ferramenta.

Este estudo teve limitações em relação à disponibilidade de indicadores que refletem variáveis muito importantes para a BHRG, por exemplo, a qualidade do solo. Apesar das limitações, este estudo apresentou resultados consistentes com a realidade da BHRG quando comparado ao diagnóstico de situação dos recursos hídricos da bacia. Além disso, também contribuiu para a integração de variáveis sociais, econômicas e ambientais sob a visão de sustentabilidade.

Este estudo traz uma importante contribuição porque o sistema de indicadores utilizado foi criado a partir de dados oficiais da BHRG. Isso possibilita a reprodução da metodologia para quaisquer outras bacias hidrográficas, que disponham de dados relevantes, com frequente coleta e disponibilização. Assim, novas análises de sustentabilidade poderão ser desenvolvidas, respeitando as peculiaridades locais e a frequência/disponibilidade dos dados.

Para a BHRG, especificamente, este estudo pode subsidiar o monitoramento do PIRH, uma vez que os indicadores utilizados são disponibilizados frequentemente por órgãos governamentais brasileiros. Além disso, as escalas de desempenho foram construídas a partir de metas estabelecidas pelos comitês de bacia, literatura científica e legislações em vigência.

É importante que os indicadores de desenvolvimento sustentável sejam selecionados em consenso com a comunidade interessada. Por isso, uma prévia deste estudo foi apresentada ao comitê de bacia da GD8. Envolver os interessados na pesquisa possibilita que as variáveis específicas envolvidas no processo de análise possam mudar com o tempo e de acordo com os interesses das partes interessadas (SINGH et al., 2009).

Os autores recomendam fortemente a reaplicação do BS após a implementação do PIRH a fim de monitorar a BHRG e fazer comparações espaço-temporais.

Por fim, conhecer a condição de sustentabilidade de bacias hidrográficas a partir do BS aumenta o grau de compreensão sobre as relações existentes entre os seres humanos e o ambiente em que vivem. Além disso, pode fornecer pontos referenciais para formulações de políticas públicas e gestão sustentável da água.

### **3.1.2.5 Conclusão**

Este estudo explorou a ferramenta Barômetro da Sustentabilidade (BS) para conhecer a condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da Bacia do Rio Grande (BHRG), previamente à implementação do Plano Integrado de Recursos Hídricos (PIRH). Além disso, identificamos áreas temáticas prioritárias que exigem maior atenção por parte dos gestores e da sociedade.

Os recursos hídricos da BHRG encontravam-se em condição “quase insustentável”, com consideráveis diferenças entre os estados de Minas Gerais e São Paulo. Os subsistemas “bem-estar ambiental” e “bem-estar humano” foram classificados como “quase insustentável” e “intermediário”, respectivamente, tanto em Minas Gerais quanto em São Paulo.

O Índice de Estresse Ambiental (ESI) e o Índice de Bem-Estar/Estresse (WSI) confirmaram os resultados do BS, demonstrando a alta pressão ambiental em função da manutenção do bem-estar humano na BHRG.

A UGRHI 01, unidade de gestão hídrica situada em São Paulo, obteve condição de sustentabilidade “intermediária”, ou seja, o melhor resultado entre todas as UGHs da bacia. Além disso, a UGRHI01 se destacou com o menor Índice de Estresse Ambiental da BHRG.

O desequilíbrio entre o desenvolvimento socioeconômico e a qualidade ambiental na BHRG é evidente. O crescimento urbano, a agricultura, as atividades industriais e o alto potencial hidrelétrico instalado contribuíram para esse desequilíbrio. Além disso, uma extensa área de vegetação nativa suprimida, baixa efetividade das políticas de recursos hídricos, precariedade no saneamento ambiental e sistema de monitoramento da água ineficiente pioram a situação. Esse desequilíbrio degrada os cursos d'água e afeta a saúde pública.

A recuperação da vegetação nativa requer maior atenção por parte dos gestores e da sociedade tanto em Minas Gerais quanto em São Paulo.

O BS é uma ferramenta flexível e de fácil aplicação. Além disso, integra as dimensões do desenvolvimento sustentável, possibilita a identificação de áreas temáticas prioritárias e exhibe os resultados de forma didática. Isso é significativamente útil para os gestores, já que facilita a tomada de decisões.

O BS tem potencial de aplicação em outras áreas e escalas para fins de monitoramento e comparações espaço-temporais.

Conhecendo a importância dos estudos de sustentabilidade, recomendamos fortemente a reaplicação do BS após a implementação do PIRH na BHRG.

Ao elaborar a escala de desempenho, os indicadores poderão ser ponderados a fim de reduzir a subjetividade da ferramenta de análise.

Apesar das limitações, consideramos a utilização da ferramenta BS eficiente para estudos de sustentabilidade.

Finalmente, identificar a condição de sustentabilidade em bacias hidrográficas possibilita uma maior compreensão sobre a relação existente entre os seres humanos e o ambiente em que vivem. Ademais, fornece pontos referenciais para a formulação de políticas públicas e gestão integrativa da água.

### **3.2 Aplicação da informação entrópica para avaliar a condição de sustentabilidade do saneamento ambiental: um estudo de caso para a Bacia do Rio Grande, Brasil<sup>7</sup>**

#### **3.2.1 Introdução**

O desenvolvimento sustentável requer satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades "(BRUNDTLAND, 1987). Três pilares ou subsistemas constituem a sustentabilidade: meio ambiente, economia e sociedade (HUANG, WU; YAN, 2015). A fim de alcançar o desenvolvimento sustentável, as Nações Unidas criaram a "Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável", que

---

<sup>7</sup> Subcapítulo baseado no artigo: GUIDOLINI, J. F.; GIAROLLA, A.; ARCOVERDE, G.F.B.; BRANCO, E.A.; OMETTO, J.P.H.B. Application of Information Entropy to Evaluate Environmental Sanitation Sustainability Conditions: A Case Study at the River Grande Basin, Brazil. (Aceito para publicação como capítulo do livro "Universities and Sustainable Communities: meeting the goals of the Agenda 2030", da série "World Sustainability" da editora "Springer" (Editores/organizadores: Walter Leal Filho, Fernanda Frankenberger, Ubirata Tortato). O livro será lançado após o evento "2nd World Symposium on Sustainability Science: Implementing the UN Sustainable Development Goals- Curitiba, Brazil - 1st-3rd April 2019".

consiste em 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas a serem cumpridas por todos os países até 2030. Entre os objetivos, inclui-se “Garantir a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos” (Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 – ODS 6).

A lei brasileira nº. 11445/2007, que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento, define o saneamento básico como um conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais, que compreende:

- a) Fornecimento de água potável: constituído pelas atividades, infraestruturas e instalações necessárias ao abastecimento público de água potável, desde a captação até as ligações prediais e respectivos instrumentos de medição.
- b) Esgotamento sanitário: constituído pelas atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, tratamento e disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até o seu lançamento final no meio ambiente.
- c) Limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destino final do lixo originário da varrição e limpeza de logradouros e vias públicas.
- d) Drenagem e manejo das águas pluviais, limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes urbanas: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas (BRASIL, 2007).

A Lei nº. 11445/2007 é fundamentada por cinco princípios: (1) Universalização do acesso - acesso de todos aos bens e serviços produzidos na sociedade, (2) Equidade - superar as diferenças evitáveis, desnecessárias e injustas, (3) Integralidade - conjunto de todas as atividades e componentes de cada um dos diversos serviços de saneamento básico, propiciando à população o acesso de acordo com a conformidade de suas necessidades e maximizando a eficácia das ações e resultados, (4) Intersetorialidade – sintonizar e integrar políticas

públicas, planos, programas e ações territoriais e (5) Sustentabilidade - integrar variáveis ambientais, sociais, econômicas e institucionais que interferem no setor de saneamento.

A fim de alcançar a efetividade da Lei nº. 11445/2007, considerando os seus princípios orientadores, e atingir o objetivo de desenvolvimento sustentável seis (ODS6) em 2030, é fundamental a aplicação de métodos de análise da sustentabilidade ou a utilização de ferramentas que orientem o planejamento e tomadas de decisão. Para isso, os indicadores apresentam-se como excelentes ferramentas para avaliar a evolução rumo ao desenvolvimento sustentável. Além disso, trabalhar com indicadores é recomendado por pesquisadores, tomadores de decisão e instituições internacionais. No entanto, a sustentabilidade é uma abordagem que exige a integração entre a conservação dos ecossistemas e subsistemas sociais, econômicos, institucionais e ambientais em um único sistema (NI et al., 2012). Desta forma, a bacia hidrográfica é uma unidade natural ou sistema único que permite esta integração (GUIDOLINI et al, 2018; TUNDISI, 2008;).

Alguns métodos de avaliação global utilizam pesos subjetivos para ponderar os indicadores e os subsistemas, tais como o AHAS - *Analytic Hierarchy Process* (Saaty, 2013), ARAS - *Additive Ratio Assessment* (Zavadskas; Turskis; Vilutiene, 2010) e ANP - *Analytic Network Process* (Carlucci, 2010), entre outros. Estes métodos apresentam algumas desvantagens como um sistema de classificação não padronizado e resultados que podem ser inconsistentes com os dados reais devido aos pesos subjetivos. Por outro lado, os chamados métodos de ponderação objetivos ignoram as preferências do analista a partir de modelos estatísticos e são baseados na quantidade inerente das informações fornecidas pelos indicadores (TOUMI; GALLO; REJEB, 2017).

Entre os métodos objetivos, destaca-se o método do peso entrópico em vários tipos de análises como: a alocação dos recursos hídricos (SUN; ZHANG; WANG, 2013); capacidade de transporte dos recursos hídricos (MA et al, 2012.); avaliação da eficiência de utilização de fósforo (LANER; ZOBOLI; RECHBERGER, 2017); avaliações de vulnerabilidade ambiental (ZHAO et al, 2018.); avaliação de sustentabilidade do esporte (LIU; CUI, 2008) e avaliação da sustentabilidade dos países da América Latina (TOUMI; GALLO; REJEB,

2017). Este método baseia-se no coeficiente de entropia de Shannon (1978), que compreende um número de propriedades desejáveis e permite a determinação do peso, considerando apenas a quantidade de informação estatística fornecida pelos indicadores (TOUMI, GALLO, REJEB, 2017). Assim, Shannon associa o conceito de entropia à ideia de que, quanto mais incerto é o resultado de um indicador, maior é a informação que se obtém ao observar a sua ocorrência.

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a condição de sustentabilidade do saneamento ambiental de duas unidades de gestão hídrica da Bacia do Rio Grande (BHRG): GD1 (Alto Rio Grande) e GD8 (Baixo Rio Grande), Brasil. Para isso, utilizamos a entropia da informação para ponderar os indicadores e subsistemas do desenvolvimento sustentável. Este estudo considerou o abastecimento de água, coleta e disposição do esgoto sanitário e resíduos sólidos. Os resultados desta pesquisa podem contribuir para o planejamento de ações e tomada de decisões a fim de alcançar ODS 6 até 2030.

### **3.2.2 Material e métodos**

Para este estudo, duas unidades de gestão hídrica da Bacia do Rio Grande foram selecionadas: GD1 (Alto Rio Grande) e GD8 (Baixo Rio Grande) (ver Figura 2.2). A seleção destas unidades ocorreu com base no estudo realizado por Guidolini et al. (2018) e descrito no capítulo 2.4. A unidade de gestão hídrica do Alto Rio Grande apresenta o menor Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) e a menor proporção de área agrícola da Bacia do Rio Grande. Em contrapartida, a unidade de gestão hídrica do Baixo Rio Grande apresenta o maior IDHM da vertente mineira e a maior proporção de área agrícola da Bacia do Rio Grande. Além disso, a GD8 é altamente industrializada e urbanizada. A GD1 é economicamente menos explorada e contempla a menor população entre as unidades de gestão hídrica da Bacia do Rio Grande no estado de Minas Gerais.

### **3.2.2.1 Seleção dos indicadores de sustentabilidade**

Os indicadores de desenvolvimento sustentável utilizados nesta pesquisa foram selecionados considerando variáveis importantes para o saneamento no Brasil, embasando-se na Lei nº. 11445/2007, literatura científica e ODS6 e suas metas para 2030. Além disso, a seleção dos indicadores foi limitada à disponibilidade e frequência de coleta e publicação dos dados. A análise foi feita para os anos 2008, 2010, 2012 e 2014.

Apesar da limitação dos dados, os indicadores selecionados permitem analisar a condição de sustentabilidade do saneamento na GD1 e GD8 e podem auxiliar no planejamento de ações e aumento da efetividade do PLANSAB (Plano Nacional de Saneamento), política nacional de saneamento e cumprimento da agenda 2030 (ODS6). Vale ressaltar que esta pesquisa utilizou dados em escala municipal. Desta forma, assumimos a média entre os municípios da GD1 e GD8 para obtermos o valor final para cada indicador e para cada unidade de gestão hídrica. Além disso, os dados do Atlas do Desenvolvimento Humano estão disponíveis apenas para 1991, 2000 e 2010 (com frequência decenal). Portanto, os dados para os períodos indisponíveis foram estimados por meio de equações de regressão linear. As definições do sistema de indicadores e fontes de dados são apresentadas na Tabela A8.

### **3.2.2.2 Método do peso entrópico para a avaliação da condição de sustentabilidade do setor de saneamento**

Os passos para a aplicação do método do peso entrópico para a ponderação de indicadores e subsistemas são explicados por Toumi, Gallo e Rejeb (2017). Os passos metodológicos para o cálculo do Índice da Condição de Sustentabilidade do Saneamento Ambiental (CSSi) são apresentados na Figura 3.9. Este indicador global permite a definição de um critério de avaliação em 5 níveis de condição de sustentabilidade. Este coeficiente reflete a situação de desenvolvimento e tendências para a GD1 e GD8 na Bacia do Rio Grande. Os critérios de avaliação são apresentados na Tabela 3.1.

Figura 3.9 – Delineamento para o cálculo do peso entrópico e do CSSi.

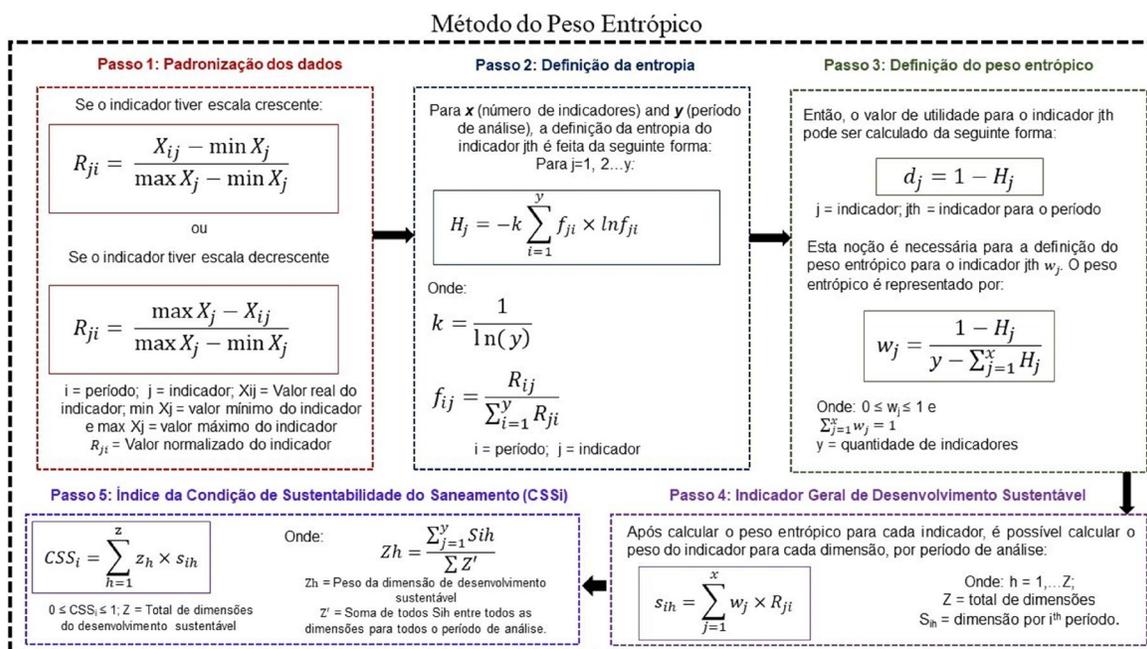


Tabela 3.1 - Critérios de avaliação dos indicadores

Nível	[0;0.2]	[0.2;0.4]	[0.4;0.6]	[0.6;0.8]	[0.8;1]
Condição	Insustentável	Estágio “fraco” de desenvolvimento sustentável	Estágio “intermediário” de desenvolvimento sustentável	Sustentável	Estágio “forte” de desenvolvimento sustentável

Fonte: Adaptado de Toumi, Gallo e Rejeb ( 2017).

### 3.2.3 Resultados

Para avaliarmos a condição de sustentabilidade do setor de saneamento nas Unidades de Gestão Hídrica (UGHs) do Alto Rio Grande (GD1) e Baixo Rio Grande (GD8), foi aplicado o método do peso entrópico ou peso de informação. A partir da entropia e peso da informação dos indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável, foi determinada a condição de sustentabilidade do setor para os anos 2008, 2010, 2012 e 2014.

### 3.2.3.1 Ponderação dos indicadores

GD1: o subsistema social destacou os indicadores S6 (mortalidade infantil - %) e S7 (pessoas hospitalizadas com doenças de veiculação hídrica – nº de pessoas) com menores entropias e maiores pesos de informação. Para S6, a entropia foi de 90,31% e o peso de informação foi de 0,4080. Os resultados foram semelhantes para S7, com 90,30% de entropia e 0,4086 de peso de informação. Os indicadores destacados no subsistema social representaram 81,66% do peso total de informação para este subsistema. O subsistema econômico destacou os indicadores E5 (Índice de Gini - adimensional) com entropia de 25,87% e de peso de informação de 0,2895 e E2 (renda per capita - R\$), com 38,19% de entropia e 0,2414 de peso de informação. Os indicadores destacados no subsistema econômico representaram 53,09% do peso total de informação para este subsistema.

Para o subsistema ambiental, os indicadores ENV2 (Total de coliformes - NMP / 100 mL), ENV5 (Nitrato - mg. L<sup>-1</sup>) e ENV4 (Fósforo Total - mg. L<sup>-1</sup>) apresentaram menor entropia e maiores pesos de informação: 60,71% / 0,2032; 61,78% / 0,2073 e 64,61 / 0,1920, respectivamente. Os indicadores destacados no subsistema ambiental representaram 61,25% do peso total de informação para este subsistema.

GD8: o subsistema social destacou os indicadores S5 (água sem tratamento – nº de famílias) e S6 (mortalidade infantil - %) com menores entropias e maiores pesos de informação. Para S5, a entropia apresentou-se em 73,09% e o peso de informação foi de 0,2913. Para S6, observou-se um valor de entropia de 76,59% e 0,2534 para o peso de informação. Os indicadores destacados no subsistema social representaram 54,47% do peso total de informação para este subsistema. O subsistema econômico destacou o indicador E5 (Índice de Gini - adimensional) com entropia de 79,08% e peso de informação de 0,5629, representando, assim, 56,26% do peso total da informação para este subsistema. Para o subsistema ambiental, o indicador ENV1 (oxigênio dissolvido - mg / L) apresentou a menor entropia (64,73%) e maior peso de informação (0,2241), seguido por ENV2 (Total de coliformes - NMP / 100 mL), com 71,58% de entropia e 0,1805 de peso de informação. Estes indicadores representaram 40,46% do peso total de informação para este subsistema.

### 3.2.3.2 Ponderação dos subsistemas

Os pesos dos subsistemas (Zh) são apresentados na Tabela 3.2. Os subsistemas apresentaram pesos semelhantes para as duas unidades de gestão hídrica. Para o Alto Rio Grande o subsistema social, econômico e ambiental apresentou peso de informação de 0,2446, 0,3964 e 0,3590, respectivamente. No Baixo Rio Grande, o subsistema social apresentou peso 0,2539, o subsistema econômico apresentou peso 0,3935 e o subsistema ambiental apresentou peso 0,3526. Os subsistemas econômico e ambiental, nas duas unidades de gestão hídrica da Bacia do Rio Grande, somaram 74% do peso total dos subsistemas, aproximadamente.

Tabela 3.2 – Peso entrópico dos indicadores, separados por dimensão do desenvolvimento sustentável.

Indicadores	GD1 (Alto Rio Grande)	GD8 (Baixo Rio Grande)
Indicadores Sociais		
S1 – Rede de abastecimento público de água (nº de famílias)	0,0360	0,1215
S2 – Coleta de Lixo (nº de famílias)	0,0054	0,1073
S3 – Coleta de esgoto (nº de famílias)	0,0059	0,1508
S4 – Ensino fundamental completo (≥ 18 anos de idade) (%)	0,0235	0,0147
S5 – Água sem tratamento (nº de famílias)	0,4080	0,2913
S6 – Mortalidade Infantil (%)	0,4086	0,2534
S7 – Pessoas hospitalizadas com doenças de veiculação hídrica (nº)	0,1450	0,0580
Indicadores Econômicos		
E1 – Produto Interno Bruto (R\$)	0,1388	0,1944
E2 – Renda per capita (R\$)	0,2414	0,0099
E3 – Taxa de atividade (≥ 18 anos de idade) (%)	0,1387	0,0094
E4 – Custo Médio de Internação (R\$)	0,1916	0,2234
E5 – Índice de GINI (adimensional)	0,2895	0,5629
Indicadores Ambientais		
ENV1 – Oxigênio Dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1293	0,2241
ENV2 – Coliformes Totais (NMP/100mL)	0,2132	0,1805
ENV3 – Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1245	0,1642
ENV4 – Fósforo Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1920	0,1545
ENV5 – Nitrato (mg.L <sup>-1</sup> )	0,2073	0,1403
ENV6 – Nitrogênio Amoniacal (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1337	0,1363

### 3.2.3.3 Índice de Condição de Sustentabilidade do Saneamento (CSSi) para o GD1 e GD8, durante o período de análise

O Índice de Condição de Sustentabilidade do Saneamento (CSSi) para a GD1 e GD8 são apresentados na Tabela 3.3 para cada período de análise. Na GD1, a condição de sustentabilidade do saneamento, em geral, evoluiu no período de 2008 a 2014. Em 2008, esta unidade atingiu o CSSi de 0,3721, diminuindo para 0,3128 em 2010, aumentando novamente para 0,5023 em 2012 e terminando 2014 com um CSSi de 0,6670. Assim, entre 2010 e 2012, a GD1 foi caracterizada por um fraco estágio de desenvolvimento sustentável relacionado ao saneamento, evoluindo para o estágio básico de desenvolvimento sustentável para o saneamento entre 2012 e 2014.

Por outro lado, a GD8 regrediu em condições de sustentabilidade de saneamento entre 2008 e 2014. Em 2008, esta unidade atingiu um CSSi de 0,5271, diminuindo para 0,3861 em 2014. Desta forma, em 2014, a GD8 foi caracterizada com fraco estágio de desenvolvimento sustentável para o saneamento.

Tabela 3.3 - Índice de Condição de Sustentabilidade do Saneamento (CSSi) para GD1 e GD8.

Período de análise	GD1 (Alto Rio Grande)	GD8 (Baixo Rio Grande)
<b>Indicadores Sociais de Desenvolvimento Sustentável</b>		
<i>Zh</i>	0,2446	0,2539
Sih 2008	0,5444	0,3507
Sih 2010	0,3541	0,5897
Sih 2012	0,2750	0,2614
Sih 2014	0,1379	0,1117
<b>Indicadores Econômicos de Desenvolvimento Sustentável</b>		
<i>Zh</i>	0,3964	0,3935
Sih 2008	0,3929	0,6617
Sih 2010	0,2265	0,1353
Sih 2012	0,5805	0,6586
Sih 2014	0,9252	0,5780
<b>Indicadores Ambientais de Desenvolvimento Sustentável</b>		
<i>Zh</i>	0,3590	0,3526
Sih 2008	0,2316	0,5041
Sih 2010	0,3800	0,5198
Sih 2012	0,5708	0,5041
Sih 2014	0,7423	0,2952
<b>Índice de Condição de Sustentabilidade do Saneamento Ambiental (CSSi)</b>		
Sih 2008	0,3721	0,5271
Sih 2010	0,3128	0,3861
Sih 2012	0,5023	0,5033
2014	0,6070	0,3603

#### **3.2.3.4 Discussão**

A aplicação do método do peso entrópico permite a mensuração da quantidade de informação útil fornecida pelo indicador de sustentabilidade. Quando a magnitude do valor entre os objetos de avaliação para o mesmo indicador é alta, a entropia é baixa (ZHI-HONG; YI; JING-NAN, 2006). Portanto, o indicador irá fornecer informações mais úteis, e seu peso será maior. Os indicadores de maior peso e menores entropias para os subsistemas sociais da GD1 e GD8 foram S6 e S7 (mortalidade infantil e número de hospitalizações por doenças de veiculação hídrica e S5 / S6 (água sem tratamento e mortalidade infantil), respectivamente. Estes indicadores refletem adequadamente a situação do saneamento nas unidades de gestão hídrica avaliadas. Apesar do notável avanço do setor de saneamento em todo o período de estudo, observa-se uma distância significativa para universalização de serviços de saneamento. Além disso, os avanços ocorrem de forma muito desigual, inclusive entre o Alto e Baixo Rio Grande.

Em 2013, a GD1 compreendia uma população de aproximadamente 363 mil pessoas. A taxa de coleta de esgotos foi de apenas 12,8%, ao passo que a GD8 apresentou uma taxa de coleta de esgoto de 43% durante o mesmo período, abrigando uma população de aproximadamente 536.300 pessoas (ANA, 2016). Vale ressaltar que 5221 famílias ainda defecavam a céu aberto na GD1 em 2013. Na GD8, 343 famílias encontravam-se na mesma situação (SIAB, 2013).

O número de famílias sem acesso à água tratada era de 19,54% na GD1 e 28,55% na GD8 em 2013. Durante o mesmo período, as perdas de distribuição de água, a partir das redes de abastecimento, atingiram 19,2% e 30,3% na GD1 e GD8, respectivamente (ANA, 2016). Em relação à coleta de lixo, 14% e 6% dos domicílios não dispunham de coleta na GD1 e GD8 em 2013, respectivamente. Melhorias na qualidade da água, saneamento básico e condições de higiene podem reduzir as doenças de veiculação hídrica, especialmente nos grupos etários mais vulneráveis, como crianças e idosos (PAIVA; SOUZA, 2018). A alta taxa de mortalidade infantil é consequência das condições sanitárias inadequadas. Apesar de reduzir, com o passar dos anos, as taxas de mortalidade infantil ainda são elevadas no Alto e Baixo Rio Grande.

O setor de saneamento brasileiro apresenta graves deficiências. A maioria das instituições do setor sanitário são desiguais e fragmentadas, devido a um modelo de regulação descentralizada (ABES, 2018). Além disso, observam-se as diferenças entre as infraestruturas de saneamento. A GD8 apresenta melhor infraestrutura em relação à GD1, o que pode ter influenciado o peso de informação dos indicadores do subsistema social S6 e S7, que são, significativamente, mais elevados em relação à GD1.

O subsistema econômico na GD1 destacou os indicadores E2 (Renda per capita) e E5 (Índice de Gini), que medem o grau de desigualdade na distribuição de renda entre uma população, com pesos mais elevados de informação e menores entropias. O subsistema econômico da GD8 também destacou o indicador E5. A renda per capita aumentou linearmente ao longo dos anos. Em contrapartida, a desigualdade na distribuição de renda não ocorreu de forma linear ao longo dos períodos de análise e apresentou valores preocupantes no Alto e Baixo Rio Grande. Em 2010, tanto a GD1 quanto a GD8 alcançaram o menor Índice de Gini para o período analisado. A renda per capita dos 10% mais pobres cresceu 69% entre 2001 e 2009, enquanto o ganho foi de 12,58% entre os 10% mais ricos. A renda média per capita dos brasileiros nesse período subiu 23,7% em termos reais (NERI, 2011).

A distribuição de renda está diretamente relacionada ao nível de escolaridade. Observa-se a renda per capita e o PIB (Produto Interno Bruto) mais elevados na GD8 quando comparados à GD1. A taxa de escolaridade (Ensino Fundamental completo) entre as pessoas com 18 anos ou mais é maior na GD8. Salvato, Ferreira e Duarte (2010) concluíram que quanto maior o percentual de renda considerado, maior a contribuição da escolaridade para as diferenças de renda. Além disso, a dispersão de renda das regiões mais pobres aumenta quando o nível de educação das regiões mais ricas é fornecido, mantendo o perfil salarial da região.

Em 2009, os custos de hospitalização por infecções gastrointestinais no Sistema Único de Saúde (SUS) foram de aproximadamente R\$ 350,00 (média nacional). Isso gerou um gasto público de R\$ 161 milhões de reais para o tratamento de pessoas infectadas e internadas em hospitais (Instituto Trata Brasil, 2018). Na GD1, o custo de internações hospitalares por doenças de

veiculação hídrica entre 2008-2014 foi de R\$ 83928,59. Na GD8, essa despesa foi de R\$ 161482,10, quase o dobro da GD1. Esses gastos poderiam ter sido evitados a partir do investimento em infraestruturas de qualidade para o setor de saneamento, focando em qualidade, universalização e justiça social (SIAB, 2013).

Finalmente, o subsistema ambiental foi representado pelos principais parâmetros de qualidade de água. O subsistema ambiental na GD1 destacou os indicadores ENV2 (coliformes totais), ENV4 (Fósforo Total) e ENV5 (Nitrato) com menores entropias e pesos de informação mais elevados. A GD8 destacou os indicadores AMB1 (oxigênio dissolvido) e AMB2 (coliformes totais) com baixas entropias e maiores pesos de informação. No geral, os parâmetros de qualidade da água estavam dentro dos limites estabelecidos por legislações brasileiras vigentes, tanto no âmbito federal quanto no âmbito estadual. Nos referimos à Resolução Legislativa COPAM / CERH-MG nº. 1 de 1 de maio de 2008 e à Resolução Conama nº. 357, de 17 de março de 2005, que fornecem classificações dos corpos hídricos e suas diretrizes ambientais e estabelecem as condições e padrões de lançamento de efluentes e outras medidas, respectivamente.

No entanto, observaram-se concentrações elevadas de coliformes totais na GD1 (18612 NMP / 100 mL) e na GD8 (49147 NMP / 100 mL) no período de 2012-2014, sendo o limite tolerável de 5000 NMP / 100 mL. Considerando o número significativo de famílias que não dispunham de instalações sanitárias no período analisado, os valores de coliformes totais elevados eram esperados. As bactérias do grupo coliforme estão presentes no intestino de animais de sangue quente e seres humanos e são eliminadas em grandes números nas fezes (106g/108g, respectivamente). O grupo coliforme inclui bactérias que não são exclusivamente de fezes e podem ocorrer naturalmente no solo, água e plantas. Além disso, os coliformes têm a capacidade de se multiplicarem em água, especialmente em regiões de clima tropical (WHO, 1996).

Embora os indicadores ENV4 (fósforo total) e ENV5 (nitrato) estivessem dentro dos limites permitidos no Alto Rio Grande durante todo o período analisado, deve-se ressaltar o fato de que esses indicadores tendem a aumentar ao longo do tempo. Isso porque o aumento de nitrato e fósforo total no ambiente

relaciona-se com o uso e ocupação do solo (urbanização, industrialização e atividades agropecuárias, especialmente) e pode causar a eutrofização da água, bem como prejudicar a saúde da população.

No Baixo Rio Grande, o fósforo total encontrava-se acima do limite estabelecido na legislação (até 0,05 mg / L em ambientes lóticos), chegando a 0,45 mg/L entre os anos 2012 e 2014. Além disso, é necessário considerar os baixos valores de oxigênio dissolvido (6,12 mg/L) e os altos valores de demanda bioquímica de oxigênio (3,72 mg / L) e de nitrogênio amoniacal (1,62 mg / L). Os limites legais para estes parâmetros são  $\geq 6$  mg/L, de até 5 mg/L ou superior a 3,7 mg/L, respectivamente.

Em vista disso, os subsistemas econômico e ambiental apresentaram os maiores pesos de informação e se relacionam com (1) o acesso a serviços de saneamento e à qualidade de vida da população e (2) à qualidade ambiental, especialmente a qualidade da água, o que afeta diretamente a saúde pública. Já o subsistema social expressa os impactos do desenvolvimento econômico e qualidade ambiental sobre a população local. Além disso, evidenciou-se o desequilíbrio entre os subsistemas dentro e entre as unidades de gestão hídrica avaliadas.

Ao analisar os resultados obtidos pelo método objetivo do peso entrópico, os baixos estágios de sustentabilidade tanto da GD1 quanto da GD8 para o setor de saneamento eram esperados, o que enfatiza a necessidade de atenção a este setor.

A respeito da economia, o saneamento é considerado um setor estratégico sob a perspectiva do desenvolvimento de um país. A expansão do investimento neste setor promoveria a melhoria da saúde da população e da qualidade ambiental, bem como criaria oportunidades de emprego. Os investimentos em saneamento, do ponto de vista social, são essenciais para a redução da pobreza. Além disso, poderia agregar valor a uma série de outras atividades econômicas, como a produção imobiliária e o turismo, por exemplo. Sob a ótica dos planos econômico e financeiro, a importância do setor de saneamento no Brasil é caracterizada pelo volume expressivo de recursos manipulados tanto por empresas diretamente responsáveis pela prestação dos serviços de

saneamento quanto por aqueles ligados ao setor industrial, que produzem equipamentos e serviços para o setor de saneamento (BRITTO; BESSA, 2009). Assim, o setor de saneamento, tanto na GD1 quanto na GD8, ainda apresenta muitos desafios a serem enfrentados nos próximos anos em relação à universalidade, equidade e integralidade dos serviços de saneamento, em conformidade com a Agenda 2030 - ODS 6. A escassez de recursos não onerosos devido à atual crise fiscal (de 2014 até os dias atuais) e o fim da desqualificação devido ao PAC (Programa de Aceleração do Crescimento) tornaram a busca por fontes de recursos para investimentos um dos maiores desafios do Brasil. Outro importante desafio a ser superado é a fragmentação significativa entre as políticas públicas ambientais e as políticas públicas para o desenvolvimento social e econômico (intersetorialidade). As políticas públicas brasileiras necessitam de uma abordagem holística com visão para a sustentabilidade.

O método do peso entrópico apresentou resultados compatíveis com a real situação da GD1 e GD8. No entanto, este método apresenta algumas limitações. Os resultados aqui apresentados estão restritos à sua metodologia. Desta forma, generalizações para diferentes períodos e outras escalas de trabalho não são possíveis. Além disso, para realizar análises espaço-temporais a partir deste estudo, é necessária a utilização do mesmo sistema de indicadores. Como vantagem, destacamos a disponibilidade (a partir de 2008) e frequência (anual) dos indicadores utilizados nesta pesquisa.

O presente estudo é útil para pesquisas futuras, especialmente aquelas que visam ao cumprimento da SDG 6 no Brasil. Ademais, fornece *insights* teóricos e práticos quanto ao uso de indicadores para avaliar as condições de saneamento sob o cenário de desenvolvimento sustentável.

### **3.2.3.5 Conclusão**

Este trabalho apresentou um método objetivo para a avaliação da sustentabilidade em unidades administrativas de bacias hidrográficas. Nós focamos o setor de saneamento básico, considerando: o abastecimento de

água, a coleta e disposição do esgoto sanitário e a coleta e destinação de resíduos sólidos.

De 2008 a 2014, o setor de saneamento no Alto Rio Grande (GD1) apresentou melhorias (especialmente entre os anos de 2012 a 2014). Deslocou-se do "estágio fraco de desenvolvimento sustentável", com CSSi (Índice da Condição de Sustentabilidade do Saneamento) de 0,3721, e avançou para o "estágio básico ou intermediário de desenvolvimento sustentável", com CSSi de 0,6670. Em contrapartida, o Baixo Rio Grande (GD8) mostrou piora da condição de sustentabilidade do setor de saneamento entre os anos 2010 e 2014 em relação a 2008. Em 2008, a CSSi da GD8 era de 0,5271, o que a caracterizava como "estágio básico ou intermediário de desenvolvimento sustentável". Em 2014, o CSSi reduziu para 0,3603, conferindo-lhe "estágio fraco de desenvolvimento sustentável" para o setor de saneamento.

Os subsistemas econômico e ambiental corresponderam a aproximadamente 74% do peso total nas unidades de gestão hídrica analisadas. Os impactos do desenvolvimento econômico e a baixa qualidade ambiental sobre o subsistema humano tornaram-se evidentes neste estudo.

Os indicadores de maior destaque, que apresentaram menores entropias e pesos de informação mais elevados, foram: (GD1): Subsistema Humano (S6 e S7); Subsistema Econômico (E2 e E5) e Subsistema Ambiental (ENV2, ENV4 e ENV5) e para (GD8) Subsistema Humano (S5 e S6); Subsistema Econômico (E5) e Subsistema Ambiental (ENV1 e ENV2).

O método do peso entrópico apresenta limitações, já que os resultados apresentados são restritos à sua metodologia. Assim, generalizações para diferentes períodos, outras escalas de trabalho e indicadores diferentes não são possíveis. No entanto, este método apresentou resultados condizentes com a situação real das áreas de estudo. Além disso, destacamos a vantagem do sistema de indicadores utilizados devido à disponibilidade e frequência dos dados, possibilitando estudos espaço-temporais sobre o setor de saneamento para todas as bacias hidrográficas do Brasil.

Estudos de avaliação de sustentabilidade são fundamentais para auxiliar o planejamento de ações e tomadas de decisão a fim de alcançar o cumprimento

das metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidas para 2030. Apesar das limitações do método aplicado, esta abordagem holística é útil para pesquisas futuras, especialmente as destinadas a atender a ODS 6 no Brasil. Além disso, este estudo fornece *insights* teóricos e práticos sobre indicadores relativos à avaliação da condição de sustentabilidade do setor de saneamento.

### **3.3 Sustentabilidade dos recursos hídricos em escala municipal: uma abordagem baseada no barômetro de sustentabilidade e entropia da informação**

#### **3.3.1 Introdução**

A gestão convencional de águas desconsidera os preceitos para a gestão sustentável. Assim, acredita que a água é um setor da administração pública e contrária aos setores de agricultura, indústria, transporte, saneamento básico e geração de energia (GUIDOLINI et al., 2018). Visto que os gestores tomam decisões diante de um sistema altamente complexo, incerto e dinâmico (YASSUDA, 1993), pesquisadores e formuladores de políticas públicas acreditam que a sustentabilidade é a melhor abordagem para retratar questões hídricas. A sustentabilidade visa suprir as necessidades do presente sem comprometer as gerações futuras de suprirem as próprias necessidades. Para isso, é importante integrar as dimensões ambiental, econômica e social em um sistema único, considerando suas peculiaridades, complexidade e dinamismo (BRUNDTLAND, 1987; CAMPOS; RIBEIRO; VIEIRA, 2014; GRAYMORE; SIPE; RICKSON, 2008).

Os indicadores têm o objetivo principal de agregar e quantificar informações, de forma que a sua relevância seja evidenciada. Ademais, os indicadores facilitam a comunicação e simplificam processos complexos (VAN BELLEN, 2004). Desta forma, o trabalho com indicadores é recomendado por pesquisadores, formuladores de políticas públicas, gestores e instituições internacionais (BOLCÁROVÁ; KOLOTTA, 2015; CORNESCU; ADAM, 2014; MOLDAN; JANOULKOVÁ, 2012) e é importante ferramenta para análise da sustentabilidade.

O Barômetro da Sustentabilidade (BS) é uma ferramenta de análise da situação do desenvolvimento que pode ser usada para refletir sobre as relações existentes entre o homem e o ambiente. Além disso, possibilita transparecer os antagonismos e convergências entre a percepção da população e os dados convencionais, o que propicia a comunicação entre atores (gestores, cientistas, formuladores de políticas públicas) (PRESCOTT-ALLEN, 1997; VAN BELLEN, 2004). A escala em porcentagem facilita a comparação e apresentação dos dados (BOSSSEL, 1999). A escala de desempenho dos indicadores deve ser transparente e as medidas “aceitáveis ou não” devem ser detalhadas e explícitas (PRESCOTT-ALLEN, 1997; VAN BELLEN, 2004). Ademais, pode ser aplicado de escala local à global, viabilizando o monitoramento e comparações espaço-temporais (ARAUJO et al., 2013; CARDOSO; TOLEDO; VIEIRA, 2016; KRONEMBERGER; CARVALHO; JUNIOR, 2004). Alguns autores consideram a escala de desempenho extremamente subjetiva (KRONEMBERGER et al., 2008) e só indicadores que possam ser expressados numericamente devem ser elencados (LUCENA; CAVALCANTI; CÂNDIDO, 2011).

Existem alguns métodos de ponderação de indicadores e subsistemas, cujos pesos são subjetivos. Entre os métodos de ponderação subjetivos, destacam-se o AHAS - Analytic Hierarchy Process (Saaty, 2013), ARAS - Additive Ratio Assessment (Zavadskas; Turskis; Vilutiene, 2010) e ANP - Analytic Network Process (CARLUCCI, 2010), entre outros. As maiores limitações desses métodos é que são constituídos por um sistema de classificação não padronizado e os resultados podem ser contraditórios aos dados reais, devido à subjetividade da ponderação. Em contrapartida, os métodos objetivos de ponderação desconsideram as predileções do analista e apoiam-se em modelos estatísticos baseados nas informações intrínsecas dos indicadores (TOUMI; GALLO; REJEB, 2017).

O método do peso entrópico ou entropia da informação destaca-se pelas inúmeras possibilidades de aplicação, como: alocação da água (SUN; ZHANG; WANG, 2013), avaliação da eficiência de uso de nutrientes (LANER; ZOBOLI; RECHBERGER, 2017) e, inclusive, análises de sustentabilidade (LIU; CUI, 2008; TOUMI; GALLO; REJEB, 2017). Esse método apoia-se no coeficiente de

entropia de Shannon (1948). Esse coeficiente consiste em um número de propriedades desejáveis que permitem a determinação do peso considerando apenas a quantidade de informação estatística fornecida pelos indicadores (TOUMI, GALLO, REJEB, 2017). Desta forma, a entropia da informação proposta por Shannon é uma forma de medir o grau médio de incerteza a respeito de fontes de informação (no caso desta pesquisa, os indicadores de sustentabilidade). Isso possibilita mensurar a quantidade de informação relacionada ao sistema (bacia hidrográfica) intrínseca no indicador.

Haja vista que a sensibilização municipal quanto à sustentabilidade tem reunido esforços (LUCENA; CAVALCANTI; CÂNDIDO; 2011), o objetivo deste estudo é analisar a condição de sustentabilidade dos recursos hídricos de municípios inseridos na Bacia do Rio Grande (BHRG), Minas Gerais, Brasil. Para isso, usamos a ferramenta BS e a entropia da informação para ponderar indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável. Os resultados apresentados implicam avanço para o gerenciamento hídrico sustentável, já que foram obtidos a partir de uma metodologia quali-quantitativa, que considera as variações espaço-temporais dos indicadores e dimensões da sustentabilidade.

### **3.3.2 Material e métodos**

Esta pesquisa consistiu em analisar a situação dos recursos hídricos, frente à sustentabilidade, em escala municipal. Os municípios aqui abordados pertencem à Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG), mais precisamente às unidades de gestão hídrica (GD1 – Alto Rio Grande) e GD8 (Baixo Rio Grande), localizadas no Estado de Minas Gerais, Brasil (ver Figuras 1.1 e 1.2). A escolha do GD1 e GD8 baseou-se no estudo de Guidolini et al. (2018a), descrito no capítulo 2.3. O critério de seleção para a escolha dos municípios foi a disponibilidade de dados ambientais. Existe séria limitação de indicadores ambientais, com séries temporais, para os municípios de Minas Gerais. Assim, este estudo analisou os municípios de Lavras, Liberdade e Nazareno (GD1), Conceição das Alagoas, Iturama e Uberaba (GD8), para os anos 2010 e 2015.

### 3.3.2.1 Seleção do sistema de indicadores para a análise da sustentabilidade

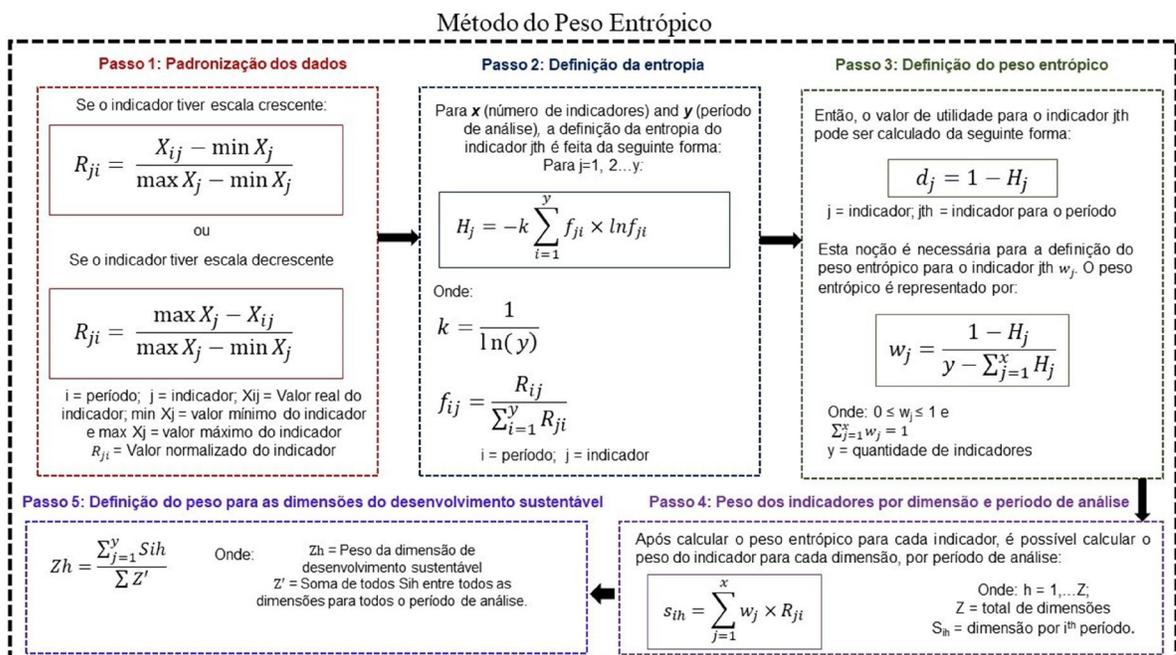
Para elencar os indicadores de desenvolvimento sustentável, consideraram-se variáveis importantes para a gestão dos recursos hídricos no Brasil, literatura científica e legislações vigentes. Além disso, a seleção dos indicadores foi limitada à disponibilidade e frequência de coleta e publicação dos dados.

Os indicadores do Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil estão disponíveis apenas para 1991, 2000 e 2010 (com frequência decenal). Portanto, os dados para os períodos indisponíveis foram estimados por meio de equações de regressão linear. As definições do sistema de indicadores e fontes de dados são apresentadas na Tabela A9.

### 3.3.2.2 Método do peso entrópico para a ponderação dos indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável

O cálculo do peso entrópico dos indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável consiste em 5 passos (SHANNON, 1948; TOUMI, GALLO E REJEB; 2017). A Figura 3.10 apresenta o delineamento do método do peso entrópico.

Figura 3.10 – Delineamento para o cálculo do peso entrópico.



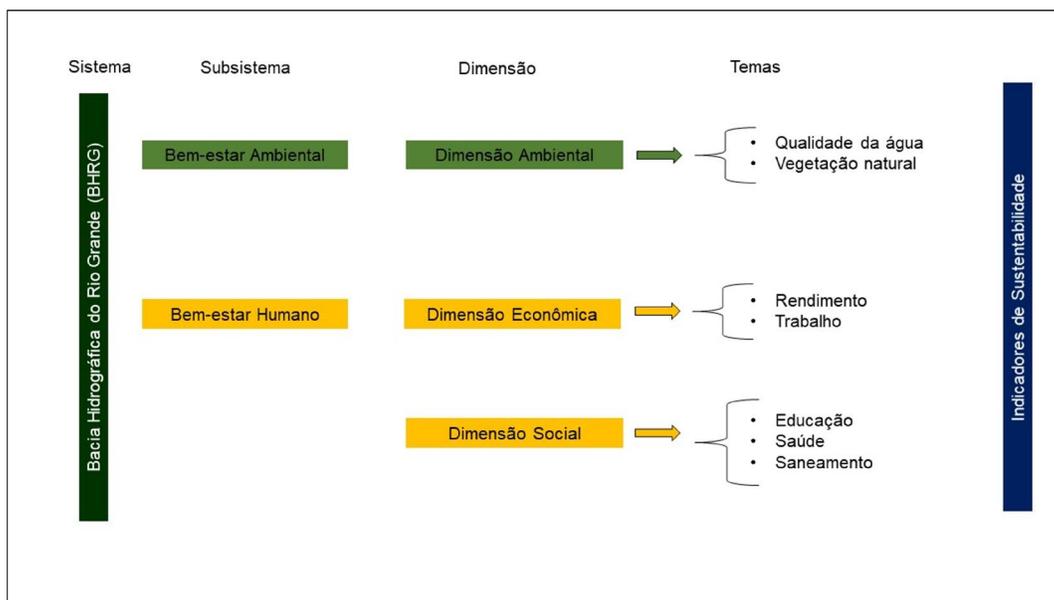
### **3.3.2.3 Barômetro da sustentabilidade**

Após a seleção, os indicadores foram distribuídos por temas e, posteriormente, por dimensões de desenvolvimento sustentável (ambiental, econômica e social). O subsistema “bem-estar humano” consistiu na média entre as dimensões social e econômica. Já o subsistema “bem-estar ambiental” constituiu-se da dimensão ambiental (Figura 3.11).

### **3.3.2.4 Elaboração da escala de desempenho dos indicadores**

A escala BS é dividida em cinco faixas, categorizadas de insustentável a sustentável. A escala de desempenho funciona de maneira semelhante. No entanto, os valores são representados pelos padrões estabelecidos em nível local, nacional ou mundial e baseiam-se em literatura científica, legislações vigentes, documentos oficiais da bacia ou representação de “metas a serem alcançadas (KRONEMBERGER et al., 2018). Assim, é possível usar a escala de desempenho para avaliar a situação do indicador em relação à referência (documentos oficiais, literatura científica, metas, legislação vigente) e possibilitar o monitoramento espaço-temporal do progresso ou retrocesso em direção ao desenvolvimento sustentável. Referências e descrições dos indicadores selecionados (separados por dimensão e tema) são apresentadas nas Tabelas A10 a A12.

Figura 3.11 – Organização dos indicadores, temas e dimensões.



Os limites dos intervalos da escala de desempenho foram definidos a partir do valor de referência. Esses limites correspondem a valores que variam de 0 a 100 na escala BS, apontando para as condições de sustentabilidade: sustentável (81-100), potencialmente sustentável (61-80), intermediário (41-60), potencialmente insustentável (21-40) e insustentável (0-20) (PRESCOTT-ALLEN, 1997).

Os indicadores podem apresentar escala crescente ou decrescente de desempenho. Para indicadores com escala de desempenho crescente, o maior valor representa o melhor desempenho. Um exemplo de indicador com escala crescente é "proporção de famílias com água tratada". Em contrapartida, para os indicadores com escala decrescente, o valor mais baixo indica o melhor desempenho. Um exemplo de um indicador com escala decrescente é "taxa de mortalidade infantil". Os valores reais dos indicadores municipais para 2010 e 2015 são apresentados nas Tabelas A12 e A13, respectivamente. As escalas de desempenho dos indicadores associadas à escala do Barômetro de Sustentabilidade podem ser observadas na Tabela A14.

### 3.3.2.5 Atribuição de valores aos indicadores na escala do BS

Após a elaboração da escala de desempenho dos indicadores, os valores reais dos indicadores foram transpostos para a escala do BS por interpolação linear simples. Em seguida, foi calculada a média aritmética do nível hierárquico mais baixo para o mais alto: indicador para o tema; tema para dimensão e dimensão para o subsistema, para o BS convencional. Para o BS mais entropia da informação, os indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável foram ponderados a partir do peso entrópico (média ponderada) (Equação 3.5).

$$BSPE = \frac{(ID1 \times PE1) + (ID2 \times PE2) + \dots + (IDn \times PE_n)}{PE1 + PE2 + \dots + PE_n} \quad (3.5)$$

Em que:

BSPE: Barômetro de Sustentabilidade Ponderado a partir do Peso Entrópico.

ID1, 2, n: Indicador ou Dimensão do Desenvolvimento Sustentável.

PE1, 2, n: Peso Entrópico do Indicador ou Dimensão do Desenvolvimento Sustentável.

O valor do indicador na escala do BS é calculado a partir da equação:

$$BSx = \left[ \frac{(DLa - DLx) \times (BSa - BSp)}{(DLa - DLp)} \right] \times (-1) + BSa \quad (3.6)$$

Em que:

BSx = valor na escala do BS.

DLa = limite anterior do intervalo que contém X na escala de desempenho.

DLx = valor real do indicador.

BSa = limite anterior ao intervalo que contém X na escala do barômetro.

BSp = limite posterior ao intervalo que contém X na escala do barômetro.

DLp = limite posterior ao intervalo que contém X na escala de desempenho.

A condição de sustentabilidade dos municípios da GD1 e GD8 para o ano 2010 e 2015 é apresentada em um gráfico bidimensional, em que o eixo X refere-se

ao bem-estar ambiental e o eixo Y refere-se ao bem-estar humano (PRESCOTT-ALLEN, 1997).

### **3.3.3 Resultados e discussão**

#### **3.3.3.1 Aplicação do método do peso entrópico para os indicadores de sustentabilidade selecionados**

Para determinarmos o peso dos indicadores selecionados, nós usamos o método do peso entrópico. A partir da entropia da informação, é possível identificar os indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável que demandam maior atenção na amostra. Vale ressaltar que o peso entrópico dos indicadores e das dimensões é para o período analisado (2010-2015). Indicadores com baixa entropia têm maior peso de informação ou peso entrópico. A Tabela 3.4 mostra o peso entrópico dos indicadores, separados por dimensão do desenvolvimento sustentável, para os municípios analisados.

Para o município de Lavras, os subsistemas social, econômico e ambiental evidenciaram os indicadores SOC3 (mortalidade infantil - %), EC3 (Produto Interno Bruto – R\$) e ENV5 (nitrato - mg. L<sup>-1</sup>), respectivamente. Para SOC3, a entropia foi de 28,12% e o peso de informação foi de 0,9111. O indicador EC3 obteve entropia de 96,31% e o peso de informação de 0,4404. Para o indicador ENV5, a entropia foi de 59,17% e o peso de informação de 0,4727.

Já para o município de Liberdade, os subsistemas social, econômico e ambiental destacaram os indicadores SOC1 (% pessoas ≥ 18 anos de idade, com Ensino Médio completo), EC3 (Produto Interno Bruto – R\$) e ENV5 (nitrato-mg. L<sup>-1</sup>), respectivamente. A entropia e o peso da informação para SOC1, EC3 e ENV5 foram de (0; 0,3719); (52,91%; 0,5797) e (65,76%; 0,6576), na devida ordem.

Os indicadores SOC5 (% de famílias com coleta de esgoto), EC1 (Índice de Gini – adimensional) e ENV2 (coliformes totais - NMP/100mL) foram evidenciados nas dimensões social, econômica e ambiental do município de Nazareno. Para SOC5, a entropia foi de 67,78% e o peso de informação foi de 0,3708. O indicador EC1 obteve entropia 0 e peso de informação de 0,4662.

Para o indicador ENV2, a entropia foi de 36,37% e o peso de informação de 0,4551.

Tabela 3.4 – Peso entrópico dos indicadores por dimensão de desenvolvimento sustentável.

Indicadores	Municípios do Alto Rio Grande (GD1)			Municípios do Baixo Rio Grande (GD8)		
	Lavras	Liberdade	Nazareno	Conceição das Alagoas	Iturama	Uberaba
Dimensão Social						
SOC1	0,0072	0,3719	0,0359	0,0460	0,0384	0,0152
SOC2	0,0640	0,0815	0,3334	0,0467	0,2141	0,5294
SOC3	0,9117	0,0224	0,1443	0,0936	0,1471	0,3804
SOC4	0,0000	0,1943	0,0040	0,2308	0,0043	0,0141
SOC5	0,0021	0,1290	0,3709	0,0452	0,0260	0,0005
SOC6	0,0125	0,0037	0,0841	0,1401	0,5471	0,0579
SOC7	0,0025	0,1972	0,0273	0,3976	0,0229	0,0025
Dimensão Econômica						
EC1	0,2405	0,0401	0,4662	0,0006	0,1534	0,0707
EC2	0,1666	0,1043	0,4152	0,2842	0,7657	0,0860
EC3	0,4404	0,5497	0,1185	0,4375	0,0042	0,8338
EC4	0,1524	0,3059	0,0000	0,2778	0,0767	0,0095
Dimensão Ambiental						
ENV1	0,000	0,0005	0,0019	0,0045	0,0000	0,0396
ENV2	0,193	0,0233	0,4551	0,0000	0,0052	0,2500
ENV3	0,011	0,0739	0,0296	0,0410	0,0614	0,0181
ENV4	0,000	0,0049	0,0000	0,7823	0,0980	0,3509
ENV5	0,473	0,5777	0,2195	0,0589	0,2743	0,2206
ENV6	0,322	0,3184	0,2921	0,1102	0,0900	0,1206
ENV7	0,000	0,0014	0,0018	0,0031	0,4711	0,0001

SOC1 – Ensino Fundamental Completo ( $\geq 18$  anos de idade - %), SOC2 – Esperança de Vida ao Nascer (anos), SOC3 – Mortalidade Infantil (%), SOC4 – Rede de Abastecimento Pública de Água (% de famílias), SOC5 - Coleta de Esgoto (% de famílias), SOC6 - Água sem Tratamento (% de famílias), SOC7 – Coleta de Lixo (% de famílias), EC1 – Índice de Gini (adimensional), EC2 – Renda per capita (R\$), EC3 – Produto Interno Bruto (R\$), EC4 – Taxa de Atividade ( $\geq 18$  anos de idade - %), ENV1 – Oxigênio Dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), ENV2 – Coliformes Totais (NMP/100mL), ENV3 – Potencial Hidrogeniônico, ENV4 – Demanda Bioquímica de Oxigênio ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), ENV5 - Nitrato ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), ENV6 Fósforo Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), ENV7 – Vegetação Natural Preservada (%)

Para o município de Conceição das Alagoas, destacaram-se os indicadores SOC7 (% de famílias com coleta de lixo), EC3 (Produto Interno Bruto – R\$) e ENV4 (Demanda Bioquímica de Oxigênio -  $\text{mg. L}^{-1}$ ), inseridos nas dimensões social, econômica e ambiental, respectivamente. Para SOC7, a entropia foi de 18,23% e o peso de informação foi de 0,3976. O indicador EC3 obteve entropia

61,40% e peso de informação de 0,2842. Para o indicador ENV4, a entropia foi de 22,23% e o peso de informação de 0,7823.

Para o município de Iturama, os subsistemas social, econômico e ambiental evidenciaram os indicadores SOC6 (% de famílias sem tratamento de água), EC2 (renda per capita – R\$) e ENV7 (vegetação natural preservada - %), respectivamente. A entropia e o peso da informação para SOC6, EC2 e ENV7 foram de (41,56%; 0,5471); (18,46%; 0,7656) e (79,75%; 0,4710).

Por fim, para o município de Uberaba, destacaram-se os indicadores SOC2 (esperança de vida ao nascer – anos de idade), EC3 (Produto Interno Bruto – R\$) e ENV4 (Demanda Bioquímica de Oxigênio - mg. L<sup>-1</sup>) inseridos nas dimensões social, econômica e ambiental, respectivamente). Para SOC2, a entropia foi de 69,69% e o peso de informação foi de 0,5294. O indicador EC3 obteve entropia 65,46% e peso de informação de 0,8338. Para o indicador ENV4, a entropia foi 0 e o peso de informação foi de 0,3508.

A Tabela 3.5 apresenta o peso entrópico das dimensões do desenvolvimento sustentável para cada município.

Tabela 3.5 - Peso entrópico das dimensões de desenvolvimento sustentável para 2010-2015

	Dimensão Social	Dimensão Econômica	Dimensão Ambiental
Lavras	0,2223	0,4378	0,3398
Liberdade	0,1511	0,2419	0,6070
Nazareno	0,4477	0,2137	0,3386
Conceição das Alagoas	0,5623	0,2712	0,1665
Iturama	0,3067	0,2812	0,4121
Uberaba	0,4543	0,4320	0,1137

É possível observar que, para o município de Lavras, a dimensão econômica correspondeu a 43,78% do peso total de informação entre as dimensões. Os municípios de Liberdade e Iturama evidenciaram a dimensão ambiental, com 60,70% e 41,21% do peso total de informação entre as dimensões, respectivamente. A dimensão social foi destaque nos municípios de Nazareno e Uberaba, com 44,77% e 45,77% do peso total de informação, na devida ordem.

Um aspecto interessante que foi constatado é que a relevância dos indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável entre os municípios variou. Além disso, é possível realizar nova seleção de indicadores, considerando a quantidade de informação que eles transmitem. Analisando mais profundamente os indicadores por município, é possível inferir:

Lavras: o peso entrópico do indicador SOC3 (mortalidade infantil) é responsável por 91,17% do peso total de informação para a dimensão social. Ao analisar os valores reais do indicador SOC3 para o município de Lavras, observa-se uma redução considerável entre 2010 e 2015 (11,4% para 6,28%), menor taxa de mortalidade infantil para o período entre os municípios analisados. No geral, todos os indicadores da dimensão econômica mostraram-se relevantes para o município de Lavras. Em relação à dimensão ambiental, os indicadores ENV2, ENV5 e ENV6 foram responsáveis por 96,66% do peso total de informação.

Liberdade: os indicadores SOC1, SOC3, SOC4 e SOC7 foram responsáveis por 78,58% do peso total de informação para a dimensão social. Para a dimensão econômica, os indicadores EC3 e EC6 representaram 85,55% do peso total de informação. Já a dimensão ambiental tem 89,60% do peso total de informação representado pelos indicadores ENV5 e ENV6.

Nazareno: para a dimensão social, os indicadores SOC2 e SOC3 têm 70,43% do peso total de informação. A dimensão econômica é representada pelos indicadores EC1 e EC2, com 88,14% do peso total de informação. Os indicadores ENV2, ENV5 e ENV6 são responsáveis por 96,66% do peso total de informação para a dimensão ambiental.

Conceição das Alagoas: os indicadores SOC4, SOC6 e SOC7 foram responsáveis por 76,85% do peso total de informação para a dimensão social. Para a dimensão econômica, os indicadores EC2 e EC3 representaram 72,18% do peso total de informação. Já a dimensão ambiental tem 89,25% do peso total de informações representadas pelos indicadores ENV4 e ENV6.

Iturama: o peso entrópico dos indicadores SOC2 e SOC6 é responsável por 76,12% do peso total de informação para a dimensão social. A dimensão econômica foi representada pelos indicadores EC1 e EC2, com 91,90% do

peso total de informação. Em relação à dimensão ambiental, os indicadores ENV5 e ENV7 foram responsáveis por 74,54% do peso total de informação.

Uberaba: para a dimensão social, os indicadores SOC2 e SOC3 têm 90,98% do peso total de informação. A dimensão econômica é representada pelo indicador EC3, com 83,38% do peso total de informação. Os indicadores ENV2, ENV4 e ENV5 são responsáveis por 82,15% do peso total de informação para a dimensão ambiental.

Observa-se grande variação espaço-temporal dos valores dos indicadores mencionados anteriormente (ver Tabelas A12 e A13 com os valores reais dos indicadores). Essa observação corrobora a literatura científica relacionada à entropia da informação, que afirma que dados mais dispersos têm maior peso de informação (ALMEIDA-SANTOS; ROCHA; HEIN, 2014; SHANNON, 1948). Em resumo, a aplicação do método do peso entrópico permite medir a quantidade de informação útil fornecida pelo indicador de sustentabilidade. Indicadores com grande variação espaço-temporal têm baixa entropia e maior peso de informação (ZHI-HONG; YI; JING-NAN, 2006).

### **3.3.3.2 Situação do desenvolvimento sob a abordagem do BS**

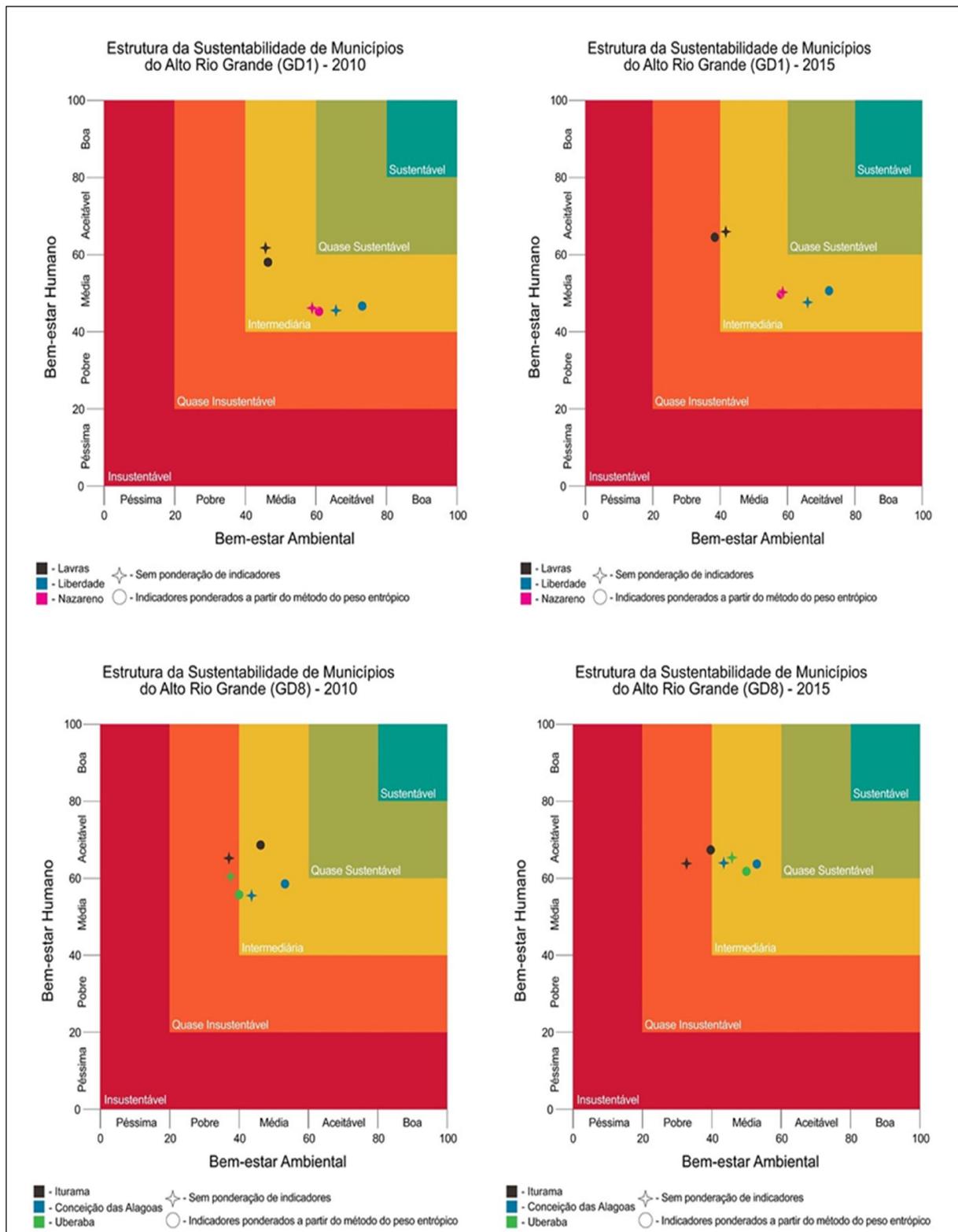
Para analisarmos a situação do desenvolvimento, sob os preceitos da sustentabilidade, nós usamos o BS. Ponderamos os indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável a partir do método do peso entrópico. Trata-se de uma análise espaço-temporal, em escala municipal, para o período de 2010 a 2015. Geralmente, o BS considera os indicadores e as dimensões igualmente relevantes para o sistema. Entretanto, os dados podem variar no espaço e no tempo. Além disso, o método do peso entrópico, por ser objetivo, aprimora a ferramenta BS, que é considerada subjetiva por muitos autores. Nós observamos que houve transições da condição de desenvolvimento para alguns municípios em 2010. Para o ano de 2015, no geral, as alterações foram insuficientes para ocasionar mudanças de situação do desenvolvimento dos municípios.

A Figura 3.12 apresenta os gráficos bidimensionais do BS para o período 2010 a 2015. É possível observar os resultados do BS sem e com ponderação dos

indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável. O gráfico mostra a condição do desenvolvimento para o subsistema bem-estar humano e para o subsistema bem-estar ambiental dos municípios da GD1 (Alto Rio Grande) e da GD8 (Baixo Rio Grande). Vale ressaltar que o subsistema bem-estar ambiental é formado pela dimensão ambiental e o subsistema bem-estar humano é formado pelas dimensões social e econômica.

Quanto ao subsistema bem-estar ambiental, em 2010, os municípios de Lavras, Nazareno e Conceição das Alagoas encontravam-se em situação intermediária de desenvolvimento, com valores 45,8; 59,0 e 43,6 na escala do BS, respectivamente. Em contrapartida, os municípios de Iturama e Uberaba encontravam-se em situação de quase insustentabilidade, com valores 37,1 e 37,6 na escala do BS, respectivamente. Liberdade se destacou sendo o único município a alcançar condição quase sustentável de desenvolvimento, com valor de 65,7 na escala do BS. Ao considerar a informação entrópica e ponderar os indicadores, Iturama é o único município que sofre transição da condição de desenvolvimento, passando de quase insustentável para intermediária (46,2 na escala do BS).

Figura 3.12 - Gráficos bidimensionais representando a condição de sustentabilidade dos municípios da GD1 (Alto Rio Grande) e GD8 (Baixo Rio Grande), para o período de 2010-2015.



Em relação ao subsistema bem-estar humano, em 2010, os municípios de Lavras, Liberdade e Iturama encontravam-se em situação de quase sustentabilidade, com valores 61,7; 66,0 e 65,2 na escala do BS, na devida ordem. Já os municípios de Nazareno, Conceição das Alagoas e Uberaba encontravam-se em situação intermediária de desenvolvimento, com valores 46,7; 55,5 e 60,4 na escala do BS, respectivamente. Considerando a informação entrópica dos indicadores para ponderá-los, observaram-se transições da condição de desenvolvimento dos municípios de Lavras (quase sustentável para intermediária, com valor 58,0 na escala do BS) e Liberdade (quase sustentável para intermediária, com valor 50,6 na escala do BS).

Em 2015, no geral, o subsistema bem-estar ambiental sofreu retrocessos em relação a 2010. Os municípios de Lavras, Nazareno, Conceição das Alagoas e Uberaba encontravam-se em situação de desenvolvimento intermediária, com valores 41,7; 58,6; 43,5 e 45,9, respectivamente. O município de Liberdade estava em situação quase sustentável de desenvolvimento, com valor de 66,0 na escala do BS. Iturama permaneceu em situação quase insustentável, com leve declínio, alcançando o valor de 32,8 na escala do BS. Considerando o peso entrópico para ponderar os indicadores, a única mudança de nível de desenvolvimento ocorreu para o município de Lavras (nível intermediário para nível quase insustentável, com valor de 38,5 na escala do BS).

No geral, é possível observar progressos entre os municípios para o subsistema bem-estar humano em 2015. Lavras, Conceição das Alagoas, Iturama e Uberaba estavam em situação quase sustentável de desenvolvimento, com valores respectivos de 65,9; 63,9; 63,8 e 65,3 na escala do BS. O município de Liberdade regrediu saindo do nível quase sustentável de desenvolvimento para o nível intermediário, com valor de 50,2 na escala do BS. Nazareno permaneceu no nível intermediário de desenvolvimento, com valor 49,7 na escala do BS. Em 2015, a ponderação dos indicadores pela informação entrópica não causou transições de nível de desenvolvimento entre os municípios.

O planejamento inadequado do uso e ocupação do solo, desconsiderando a sua capacidade de suporte, ocasionou sérios impactos à sociedade, como a contaminação dos mananciais hídricos. Isso afeta diretamente a saúde da população (OLIVEIRA et al., 2009; VIDAL; CAPELO NETO, 2014).

No geral, os indicadores SOC3 (mortalidade infantil), SOC6 (% de famílias sem água tratada), EC2 (renda per capita), EC3 (produto interno bruto), ENV5 (nitrito) e ENV6 (fósforo total) foram proeminentes em dois ou mais municípios. Em 2015, houve redução da mortalidade infantil e aumento da acessibilidade à água tratada nos municípios analisados, em relação a 2010. Apesar dos avanços, há ainda um longo percurso para alcançar a universalização dos serviços de saneamento. As doenças transmitidas pela água podem ser reduzidas melhorando o saneamento básico, as condições de higiene e a qualidade da água, especialmente nos grupos de maior vulnerabilidade, como idosos e crianças (PAIVA; SOUZA, 2018). Victora (2001), em sua pesquisa sobre potenciais intervenções para reduzir a mortalidade infantil pré-escolar e materna no Brasil, diz que:

“A literatura brasileira confirma a associação entre o fornecimento de água e a mortalidade de menores de cinco anos. Somente um estudo abordou o papel do fornecimento de água na mortalidade por diarreia: na Região Sul, o risco observado foi 3,9 vezes maior em domicílios sem água encanada, mas não houve efeito das instalações de saneamento após ajuste para o fornecimento de água e status socioeconômico. Em uma abrangente revisão, estimou-se que 21% do total de mortes por diarreia poderiam ser evitadas através de melhorias no abastecimento de água” (VICTORA, 2001, p. 38).

Dessa forma, gerenciar a água integrando, otimizando e alocando-a de forma correta, considerando os múltiplos usos, e investir no setor de saneamento são formas eficientes de alcançar a sustentabilidade do desenvolvimento. Isso porque melhora a qualidade de vida da população, gera emprego, renda e aumenta a capacidade de abastecimento de água (GUIDOLINI et al., 2018b; TUNDISI, 2008;).

Quanto aos indicadores ambientais, ENV5 e ENV6, observou-se tendência ao aumento dos nutrientes nitrogênio e fósforo na água. Para o ENV5 (nitrito), nenhum município ultrapassou o limite de 10 mg. L<sup>-1</sup> previsto na legislação (BRASIL, 2007). Entretanto, para o ENV6 (fósforo total), todos os municípios analisados estão acima do limite permitido, que é de 0,05 mg. L<sup>-1</sup> (BRASIL, 2007) (ver valores reais dos indicadores nas Tabelas A12 e A13). O excesso

de nitrogênio e fósforo na água favorece o processo de eutrofização (proliferação de cianobactérias). O enriquecimento da água por nutrientes se dá pelo uso dos recursos hídricos como receptores de descargas pontuais e difusas em decorrência da urbanização, industrialização e atividades agropecuárias. Essas descargas, além de ocasionarem alteração da estrutura trófica do manancial, possibilitam a perda da capacidade de abastecimento humano, manutenção da vida aquática e recreação (VIDAL; CAPELO NETO, 2014). Vale ressaltar que coletar esgoto e resíduos sólidos não significa tratá-los ou destiná-los corretamente. Guidolini et al. (2018b), em estudo sobre a sustentabilidade dos recursos hídricos da Bacia do Rio Grande, observaram que a proporção de municípios com acesso à rede de abastecimento de água e coleta de resíduos sólidos e esgoto era razoável em 2013. No entanto, a destinação correta dos resíduos sólidos ao aterro sanitário e o tratamento de efluentes e esgoto ocorriam em proporções muito reduzidas. Além disso, a eficiência do tratamento de água e esgoto no Brasil, no geral, é baixa.

Economicamente, o saneamento é considerado um setor estratégico para o desenvolvimento de um país porque promove a saúde da população e a qualidade ambiental e gera novas oportunidades de emprego. Além disso, o saneamento agrega valor a outras atividades econômicas, como turismo e mercado imobiliário, por exemplo. Assim, aumenta a riqueza regional (EC3) e aumenta a renda per capita (EC2) (BRITO; BESSA, 2009; GUIDOLINI et al., 2018b).

Diante do exposto, o ponto forte deste estudo é o aprimoramento da ferramenta BS, considerada subjetiva, apoiando-se na entropia da informação para ponderação dos indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável. O peso de informação intrínseco nos indicadores possibilitou evidenciá-los nos municípios. Os indicadores ressaltados neste estudo obtiveram maior variação espaço-temporal e maior peso entrópico. Em contrapartida, indicadores não evidenciados, no geral, mantiveram-se constantes no período analisado. Para pesquisas de sustentabilidade, é desejável considerar as variações espaciais e temporais dos indicadores. Isso porque o sistema terrestre, independentemente de escala, é dinâmico. Assim, o BS, aliado ao método do peso entrópico, é uma boa ferramenta para análise da condição de sustentabilidade. Para os

municípios analisados, é possível reaplicar a metodologia para avaliar a evolução do desenvolvimento.

Entre as limitações deste estudo, a principal delas foi a disponibilidade de dados em escala municipal, especialmente dados ambientais. Devido à restrição de informações, não foi possível analisar todos os municípios da GD1 (Alto Rio Grande) e GD8 (Baixo Rio Grande). Além disso, os resultados apresentados restringem-se à metodologia. Desta forma, generalizações dos resultados para outros sistemas de indicadores, outras escalas ou período de análise não são possíveis.

Os resultados apresentados nesta pesquisa avançam a fronteira do conhecimento em relação à gestão de águas, especialmente no Brasil. As questões hídricas devem ser abordadas sob os preceitos de desenvolvimento sustentável. Por isso, os métodos de mensuração da sustentabilidade tornam-se tão importantes. Estes resultados implicam melhorias para o gerenciamento hídrico porque foram obtidos a partir de uma metodologia quali-quantitativa, que considera as variações espaço-temporais dos indicadores e dimensões da sustentabilidade. Ao agregar a entropia da informação (método objetivo e quantitativo) ao BS, a dinâmica do sistema (município) é considerada no processo. Assim, os resultados são mais condizentes com a realidade. Sabendo a relevância que as pesquisas de sustentabilidade têm para o avanço de políticas públicas, este trabalho apresenta resultados importantes para assessorar o monitoramento da condição hídrica a fim de alcançar o ODS6 (Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6).

#### **3.3.4 Conclusão**

Este trabalho apresentou uma análise de sustentabilidade dos recursos hídricos, em escala municipal. Para isso, aplicou-se uma metodologia quali-quantitativa baseada na ferramenta Barômetro de Sustentabilidade aliada à entropia da informação.

Os indicadores SOC3 (mortalidade infantil), SOC6 (% de famílias sem água tratada), EC2 (renda per capita), EC3 (produto interno bruto), ENV5 (nitrato) e ENV6 (fósforo total) foram proeminentes em dois ou mais municípios. Os

indicadores evidenciados têm grande variação espaço-temporal, portanto maior peso de informação dentro da amostra (município).

Quanto ao peso entrópico das dimensões da sustentabilidade, para o município de Lavras, a dimensão econômica correspondeu a 43,78% do peso total de informação entre as dimensões. Os municípios de Liberdade e Iturama evidenciaram a dimensão ambiental, com 60,70% e 41,21% do peso total de informação entre as dimensões, respectivamente. A dimensão social foi destaque nos municípios de Nazareno e Uberaba, com 44,77% e 45,77% do peso total de informação, na devida ordem.

A condição dos recursos hídricos municipais, no geral, é intermediária, para o período de análise.

Houve transições de condição do desenvolvimento ao ponderar os indicadores pela entropia da informação, especialmente para o bem-estar humano, em 2010. Apesar disso, o método BS mais entropia da informação apresentou-se eficiente para análise da sustentabilidade por dois motivos: (1) os resultados a partir da ponderação do peso entrópico em relação ao BS tradicional foram muito adjacentes. Ou seja, os casos de transição ocorreram, mas a diferença entre os valores do BS tradicional e o BS ponderado pelo método do peso entrópico é modesta e (2) essa inovação metodológica considera a experiência e subjetividade do analista sem comprometer a qualidade do resultado da análise.

Entre as limitações deste estudo, a principal delas foi a disponibilidade de dados em escala municipal, especialmente dados ambientais. Devido à restrição de informações, não foi possível analisar todos os municípios da GD1 (Alto Rio Grande) e GD8 (Baixo Rio Grande). Além disso, os resultados apresentados restringem-se à metodologia.

Os resultados apresentados implicam avanço para o gerenciamento hídrico sustentável, já que foram obtidos a partir de uma metodologia quali-quantitativa, que considera as variações espaço-temporais dos indicadores e dimensões da sustentabilidade.

Sabendo a relevância que as pesquisas de sustentabilidade têm para o avanço de políticas públicas, este trabalho apresenta resultados importantes para

assessorar o monitoramento da condição hídrica a fim de alcançar os objetivos do desenvolvimento sustentável, especialmente o 6 (Água limpa e Saneamento).

## 4 DISCUSSÃO GERAL

Esta tese visou analisar a situação dos recursos hídricos frente à sustentabilidade usando a ferramenta Barômetro da Sustentabilidade (BS) e o método do peso entrópico ou entropia da informação. O objeto de estudo foi a Bacia Hidrográfica do Rio Grande - BHRG (estados de Minas Gerais e São Paulo), Brasil. A tese trabalhou diferentes escalas: bacia hidrográfica, unidades administrativas da bacia hidrográfica ou unidades de gestão de hídrica (UGHs) e municípios. Para compreender a relevância da temática para o avanço da Ciência do Sistema Terrestre, primeiramente foi feito um diagnóstico físico-conservacionista para a BHRG (Capítulo 2), dividido em 3 subcapítulos: (1) Caracterização morfométrica, (2) Potencial de uso do solo e áreas de conflito ambiental e (3) Análise exploratória dos dados do diagnóstico de situação dos recursos hídricos da BHRG. O estudo da morfometria, potencial de uso da terra e conflitos ambientais em uma bacia hidrográfica indica o caminho para o planejamento adequado do uso e ocupação do solo, considerando a capacidade de suporte do mesmo. Além disso, fornece *insights* sobre o comportamento hidrológico regional. A análise exploratória dos indicadores do diagnóstico de situação dos recursos hídricos evidenciou as variáveis mais representativas para a área de estudo, as quais merecem maior atenção por parte dos gestores.

Em seguida, iniciou-se o estudo da situação dos recursos hídricos na BHRG em relação à sustentabilidade (Capítulo 3), dividido em 3 subcapítulos: (1) Sustentabilidade dos recursos hídricos da BHRG baseando-se no BS; (2) Estudo da condição de sustentabilidade do setor de saneamento em UGHs da BHRG, apoiando-se na entropia da informação, e (3) Sustentabilidade dos recursos hídricos em escala municipal, baseando-se no BS e entropia da informação.

Este capítulo final sintetiza as principais conclusões de toda a tese e discute como esses resultados confirmaram a hipótese desta pesquisa: “para manter o bem-estar humano, o ambiente sofre alto estresse”. Trata-se de um grande desequilíbrio entre o desenvolvimento socioeconômico e a qualidade ambiental na BHRG, que fere os preceitos da sustentabilidade.

Este último capítulo está dividido em três seções, a seção 4.1 apresenta as principais descobertas de cada capítulo, a seção 4.2 discute sobre a abordagem BS mais entropia da informação e possibilidade de pesquisas futuras e a seção 4.3 traz algumas recomendações para aumentar a efetividade da gestão hídrica na BHRG e outras bacias hidrográficas brasileiras, sob os fundamentos da sustentabilidade.

O Capítulo 2 descreveu as características morfométricas, determinou o uso potencial do solo da BHRG e apresentou a análise exploratória dos dados do diagnóstico de situação dos recursos hídricos. A caracterização morfométrica foi realizada para a BHRG como um todo, sem compartimentações, em sistema de informação geográfica. Consideraram-se variáveis geométricas, de relevo e de drenagem. Os resultados mostraram que a BHRG é de ordem cinco, com padrão de drenagem dendrítico, baixa susceptibilidade a inundações sob condições normais precipitação, tendo cursos d'água sinuosos e relevo ondulado. Além disso, a BHRG é permeável, mal drenada e tem baixa capacidade de gerar e manter trechos de drenagem. As variáveis morfométricas analisadas de forma integrada indicaram que o mal planejamento do uso e a ocupação do solo podem facilitar a ocorrência de inundações e perda de solo por erosão hídrica.

Para a determinação do uso potencial do solo, a BHRG foi compartimentada em 15 sub-bacias. O estudo apoiou-se no método do Coeficiente de Rugosidade (RN) aliado à teoria do conflito, que considera a capacidade de suporte do solo. Para isso, foi necessário calcular a Densidade de Drenagem (Dd) e a Declividade Média (Dm) para cada sub-bacia. Todo o processo aconteceu em ambiente SIG. Os resultados mostraram alto potencial de uso agropecuário (86,6% das sub-bacias) e predomínio do uso correto ou aceitável do solo na BHRG. Entretanto, foram identificados conflitos ambientais classe 1, 2 e 3 em algumas sub-bacias do Rio Grande, sugerindo maiores riscos de degradação ambiental.

O terceiro subcapítulo explorou os dados do diagnóstico de situação dos recursos hídricos, publicado em 2008, a partir da análise de componentes principais (ACP) e análise de *cluster* (AC) para identificar e compreender as similaridades e antagonismos entre as UGHs e os Estados de Minas Gerais e

São Paulo. Em relação às similaridades, os resultados mostraram que as UGHs com maiores proporções de áreas cultivadas apresentaram melhores Índices de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) e tendem a ser melhor estruturadas quanto ao monitoramento da água e saneamento ambiental. Entretanto, a precária e ineficiente infraestrutura desses segmentos tem prejudicado a qualidade da água e ameaçado a saúde da população. Em UGHs com maiores proporções de vegetação natural preservada e menor exploração econômica, o número de pessoas hospitalizadas por doenças de veiculação hídrica e a produção de resíduos sólidos e esgoto são, consideravelmente, menores. Entretanto, tendem a ter menor infraestrutura de saneamento e monitoramento da água. No geral, o Estado de São Paulo é melhor estruturado em termos de gestão de águas quando comparado com Minas Gerais. O Estado dispõe de melhor infraestrutura de saneamento e monitoramento de água e tem maior quantidade de instrumentos de gestão hídrica implementados e maiores IDHs.

A conclusão geral do capítulo é que o uso e a ocupação do solo na BHRG influem no comportamento hidrológico regional, ocasionando picos de inundação e perda de solo por erosão, comprometendo a qualidade e disponibilidade de água e inúmeros outros serviços ecossistêmicos prestados. É possível observar que o uso do solo, em algumas áreas, não condiz com o seu potencial de uso, caracterizando, assim, as áreas de conflito ambiental. É possível inferir, a partir dos resultados apresentados e conhecimento prévio sobre a situação da BHRG, que os episódios de inundação e milhares de feições erosivas cadastradas, por exemplo, são indicadores de elevado estresse ambiental. O desenvolvimento socioeconômico não tem caminhado junto à preservação do ecossistema.

O Capítulo 3, dividido em 3 subcapítulos, avaliou a condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da BHRG, baseando-se no BS e entropia da informação.

O primeiro subcapítulo avaliou a sustentabilidade dos recursos hídricos da BHRG, baseando-se nos indicadores do diagnóstico de situação dos recursos hídricos, publicado em 2008. Para isso, utilizou-se a ferramenta BS. O estudo foi desenvolvido para todas as UGHs da bacia. Os resultados mostraram que

os recursos hídricos da BHRG encontravam-se em condição “quase insustentável”. Os subsistemas “bem-estar ambiental” e “bem-estar humano” foram classificados como “quase insustentável” e “intermediário”, respectivamente, tanto em Minas Gerais quanto em São Paulo. A UGRHI01, unidade de gestão hídrica situada no estado de São Paulo, obteve condição de sustentabilidade “intermediária”, ou seja, o melhor resultado entre todas as UGHs da BHRG.

O segundo subcapítulo avaliou a condição de sustentabilidade do setor de saneamento em duas UGHs da BHRG: GD1 (Alto Rio Grande) e GD8 (Baixo Rio Grande), para o período de 2008 a 2014. Este estudo baseou-se, exclusivamente, no método do peso entrópico. Os resultados empíricos deste estudo indicaram condições inaceitáveis de sustentabilidade para o setor de saneamento tanto para a GD1 quanto para a GD8, durante o período analisado. Os impactos do desenvolvimento econômico e da baixa qualidade ambiental no subsistema humano foram colocados em evidência.

Por fim, o terceiro subcapítulo analisou a sustentabilidade dos recursos hídricos em escala municipal. Para isso, foi usada a ferramenta BS e a entropia da informação para ponderar os indicadores e as dimensões do desenvolvimento sustentável. Foram analisados os municípios de Lavras, Liberdade e Nazareno (GD1 – Alto Rio Grande) e Conceição das Alagoas, Iturama e Uberaba (GD8 – Baixo Rio Grande), para os anos de 2010 e 2015. Os resultados mostraram que os indicadores SOC3 (mortalidade infantil), SOC6 (% de famílias sem água tratada), EC2 (renda per capita), EC3 (produto interno bruto), ENV5 (nitrato) e ENV6 (fósforo total) foram proeminentes em dois ou mais municípios. Os indicadores evidenciados têm grande variação espaço-temporal, portanto maior peso de informação dentro da amostra (município). Em relação ao peso entrópico das dimensões do desenvolvimento sustentável, para o município de Lavras, a dimensão econômica correspondeu a 43,78% do peso total de informação entre as dimensões. Os municípios de Liberdade e Iturama evidenciaram a dimensão ambiental, com 60,70% e 41,21% do peso total de informação entre as dimensões, respectivamente. A dimensão social foi destaque nos municípios de Nazareno e Uberaba, com 44,77% e 45,77% do peso total de informação, na devida ordem. No geral, a condição de

sustentabilidade dos municípios analisados, para os anos de 2010 e 2015, é “intermediária”. O método BS mais entropia da informação mostrou-se eficiente e aumentou a fiabilidade dos resultados da análise da sustentabilidade dos recursos hídricos da BHRG. Isso porque este novo método complementa o conhecimento subjetivo e experiência do analista com a objetividade estatística proposta por Shannon (1948), que expõe as informações intrínsecas dos indicadores.

A partir dos resultados apresentados nesta tese, é possível concluir que os recursos hídricos da BHRG encontram-se em condição inaceitável de sustentabilidade, independentemente da escala (bacia, UGHs ou municípios) ou método de análise (BS, entropia da informação ou BS aliado à entropia da informação). Desta forma, a hipótese da pesquisa é confirmada: para manter o bem-estar humano, o ambiente sofre elevado estresse. A confirmação da hipótese contraria os fundamentos do desenvolvimento sustentável. Apesar disso, esta pesquisa apresenta informações de grande relevância para alcançar a gestão sustentável da bacia e alternativas viáveis e eficientes para monitorar a evolução e variabilidade espaço-temporal da sustentabilidade.

#### **4.1 Abordagem “barômetro de sustentabilidade mais entropia da informação” e pesquisas futuras**

O BS da sustentabilidade e o método do peso entrópico aplicados conjuntamente para analisar a sustentabilidade são uma abordagem inovadora, além de ser um estudo pioneiro para a BHRG. A abordagem BS mais entropia da informação implica uma ferramenta quali-quantitativa, eficiente e aplicável em qualquer escala de trabalho (local, regional, nacional ou global). Além disso, é uma abordagem objetiva que permite o monitoramento espaço-temporal, tão importante para a gestão. O método Barômetro de Sustentabilidade mais Entropia da Informação mostrou-se eficiente para análise de sustentabilidade. É um método que complementa a experiência e o conhecimento do analista com a objetividade estatística. Isso porque a ponderação é obtida a partir das informações intrínsecas dos indicadores, baseando-se no coeficiente de Shannon (1948). O peso entrópico do indicador é maior, quanto maior for a sua variação na amostra, ou seja, método

puramente estatístico que independe do analista. Ademais, é uma metodologia que expressa a variabilidade espaço-temporal dos indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável. Essa variabilidade é relevante em pesquisas de sustentabilidade porque o cenário a ser analisado será sempre um sistema complexo e dinâmico, como a bacia hidrográfica, por exemplo. Ao agregar a entropia da informação (método objetivo e quantitativo) ao BS, a dinâmica do sistema é evidenciada no processo.

Entretanto, entre as limitações dessa abordagem, pode-se citar a necessidade de obter um sistema de indicadores de sustentabilidade com série temporal. O método do peso entrópico pede, ao menos, duas datas (neste trabalho, analisamos os anos 2010 e 2015, por exemplo). Além disso, a disponibilidade de dados, especialmente ambientais, para os pequenos municípios brasileiros, é muito falha ou inexistente. Ademais, seleciona-se apenas os indicadores que podem ser expressos numericamente. O uso dessa abordagem é restrito à sua metodologia. Não é possível fazer generalizações.

Pesquisas que visem à gestão hídrica ou territorial sustentáveis são encorajadas a usarem a abordagem aqui descrita porque trata-se de dois métodos reconhecidos pela comunidade científica, usados conjuntamente.

## **4.2 Recomendações**

Recomendam-se análises periódicas da sustentabilidade na BHRG (anual, por exemplo) para monitorar a evolução do desenvolvimento e identificar áreas prioritárias. Com a implementação do Plano Integrado de Recursos Hídricos (PIRH), a análise torna-se ainda mais importante.

Apresentamos, aqui, algumas abordagens que visam monitorar o desenvolvimento sustentável. Entretanto, é necessário que haja a sensibilização de todos os atores (cientistas, formuladores de políticas públicas, gestores, usuários, sociedade em geral) para as questões relacionadas à água. O desenvolvimento socioeconômico só acontece devido aos recursos naturais, assim, não se deve pensar em economia, sociedade e ambiente isoladamente.

A partir dos resultados desta pesquisa, tornou-se ainda mais evidente a fragmentação das políticas públicas. O fato é que a água transpõe quaisquer setores da administração pública, simplesmente porque é um bem vital.

Obviamente, a integração das políticas públicas não é trivial no Brasil. A gestão de recursos hídricos brasileira constituiu-se fragmentada da gestão ambiental e outros setores da administração pública. Entretanto, torna-se cada vez mais necessária a abordagem holística, integrativa e sistêmica para tratar as questões relacionadas à água.

Assim, esta pesquisa contribui ao apresentar a condição inaceitável de desenvolvimento da BHRG, a partir de metodologias facilmente aplicáveis para mensurar a sustentabilidade. Ademais, mostra os principais problemas sob uma visão holística e traz recomendações para os gestores da BHRG.

Para a ciência do Sistema Terrestre, esta pesquisa avança a fronteira do conhecimento em relação à gestão hídrica e territorial ao apresentar estratégias para a análise e o monitoramento da sustentabilidade, destacando a forte relação de dependência entre o homem e o ambiente. Além disso, o BS mais entropia da informação complementa a experiência e conhecimento do analista com um método objetivo de ponderação de indicadores. Assim, torna-se possível analisar e monitorar a sustentabilidade com maior fiabilidade e considerando as variações espaço-temporais dos indicadores e dimensões do desenvolvimento sustentável.

Para muitos, a crise econômica, hoje, é a questão prioritária. É compreensível. Entretanto, não há economia e sociedade que se desenvolva sem água.

## 5 CONCLUSÃO

O Barômetro de Sustentabilidade aliado à entropia da informação é um método inovador e mostrou-se eficiente para a análise da sustentabilidade dos recursos hídricos da Bacia do Rio Grande. Ao complementar o conhecimento subjetivo e experiência do analista com a objetividade estatística, tornou-se possível a análise e monitoramento espaço-temporal dos indicadores e dimensões de sustentabilidade considerando o dinamismo do sistema. Esta é uma característica relevante em pesquisas de sustentabilidade porque o sistema a ser analisado será sempre complexo e dinâmico.

A condição de sustentabilidade dos recursos hídricos da Bacia do Rio Grande é inaceitável. Para alcançar nível aceitável de desenvolvimento sustentável, é necessário, primeiramente, mudar a concepção de que o meio ambiente não está atrelado ao desenvolvimento socioeconômico. Ao contrário, o meio ambiente é a força motriz da economia e presta serviços fundamentais para a manutenção da vida humana, como a água e o solo, por exemplo.

Nicholas Georgescu-Roegen, muito sabiamente, disse que mesmo que o homem compreenda o que deve fazer para salvar o meio ambiente – e, conseqüentemente, salvar a si mesmo - a natureza humana impede-o de seguir o conselho da sensatez. Há, certamente, uma crise ecológica e energética, mas ao que parece, a verdadeira crise é a crise da sensatez humana.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Qualidade da água na Bacia do Rio Grande**. 2013. Disponível em:  
<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>. Acesso em: 16 nov. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Diagnóstico preliminar da bacia do Rio Grande**. Brasília: ANA, 2015. 462p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Produto parcial PP02:diagnóstico da Bacia do Rio Grande**. 2016. 553p. Disponível em:  
[http://pirhgrande.ana.gov.br/Arquivos/3.Diagnostico\\_Integrado/Diagn%C3%B3stico%20Integrado.pdf](http://pirhgrande.ana.gov.br/Arquivos/3.Diagnostico_Integrado/Diagn%C3%B3stico%20Integrado.pdf). Acesso em: 13 out. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Relatório final: plano integrado de recursos hídricos para a Bacia Hidrográfica do Rio Grande**. 2017. 309p. Disponível em: [http://pirhgrande.ana.gov.br/Arquivos/7.Produutos\\_Finais/1317-ANA-04-RH-RT-0001-R2.pdf](http://pirhgrande.ana.gov.br/Arquivos/7.Produutos_Finais/1317-ANA-04-RH-RT-0001-R2.pdf). Acesso em: 13 out. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Indicadores de qualidade: Índice de Qualidade das Águas (IQA)**. 2019. Disponível em:  
<<http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>>. Acesso em: 17 mar. 2019.

ALTAF, F.; MERAJ, G.; ROMSHOO, S. A. Morphometric analysis to infer hydrological behaviour of lidder watershed, western Himalaya, India. **Geography Journal**, v. 2013, p.1-14, 2013.

ALMEIDA-SANTOS, P. S.; ROCHA, I.; HEIN, N. Utilização da entropia informacional na seleção de indicadores financeiros mais relevantes para tomada de decisão no setor público: o caso dos estados brasileiros. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 19, n. 2, p. 83–105, 2014.

AMERI, A. A.; POURGHASEMI, H. R.; CERDA, A. Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: a comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models. **Science of the Total Environment**, v. 613/614, p.1385-1400, 2018.

ARAÚJO, G. C.; PIMENTA, H.C.D.; REIS, L.M.M.; CAMPOS, L.M.S. Diagnosis of sustainability in the brazilian City of Touros: an application of the Barometer of Sustainability. **Holos**, v. 2, n. 29, p.161-177, 2013.

ARAÚJO, R.S.; ALVES, M.T.C.; MELO, Z.M.P.; CHRISPIM, M.P.; SILVA JUNIOR, G.C. Water resource management: a comparative evaluation of Brazil, Rio de Janeiro, the European Union, and Portugal. **Science of the Total Environment**, v. 5, n. 11, p. 815-828, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL - ABES. **Impactos da crise sobre o setor de saneamento**. Disponível em: <http://abes.dn.org.br/pdf/28Cbesa/ConjunturaeSaneamento.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2018.

BAO, C.; ZOU, J. Analysis of spatiotemporal changes of the human-water relationship using water resources constraint intensity index in Northwest China. **Ecological Indicators**, v. 84, p.119-129, 2018.

BOLCÁROVÁ, P.; KOŁOŁTA, S. Assessment of sustainable development in the EU 27 using aggregated SD index. **Ecological Indicators**, v. 48, p.699-705, 2015.

BOSSEL, H. **Indicators for sustainable development: theory, methods, applications: a report to Balaton Group**. Winnipeg, MB, Canada: International Institute for Sustainable Development, 1999. 124p.

BRASIL. Lei nº. 11.445 de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Presidência da República**. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm). Acesso em: 15 nov. 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Sistema de informação da atenção básica**. 2008. Disponível em: <http://www2.datasus.gov.br/SIAB/index.php?area=01>. Acesso em: 16 nov. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **Lei n. 9.433: política nacional de recursos hídricos**. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 1997. 72p.

BRITTO, A. L. N. P; BESSA, E. R. A. S. **Nota técnica saneamento: projeto perspectivas do investimento no Brasil**. Rio de Janeiro; Campinas: UFRJ; UNICAMP, 2009. (Relatório Técnico).

BRUNDTLAND COMMISSION. **Our common future**: report of the World Commission on Environment and Development. 1987. Disponível em: <http://www.ask-force.org/web/Sustainability/Brundtland-Our-Common-Future-1987-2008.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2018.

BUENO, L. F.; GALBIATTI, J. A.; BORGES, M. J. Monitoramento de variáveis de qualidade da água do Horto Ouro Verde - Conchal - SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p.742-748, 2005.

CAMPANHARO, W. A. **Diagnóstico físico da bacia do Rio Santa Maria do Doce- ES**. 2012. 78p. Monografia (Especialização em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

CAMPOS, M. V.C.V.; RIBEIRO, RIOS, M. M.; VIEIRA, Z. M. C. A gestão de recursos hídricos subsidiada pelo uso de indicadores de sustentabilidade. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p.209-222, 2014.

CARDOSO, A. S.; TOLEDO, P. M.; VIEIRA, I. C. G. Barômetro da sustentabilidade aplicado ao município de Moju, Estado do Pará. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Taubaté, v. 12, n. 1, p.234-263, 2016.

CARDOSO, L.O.; CARVALHO, M.S.; CRUZ, O.G.; MELERE, C.; LUFT, V.C.; MOLINA, M.C.B.; FARIA, C.P.; BENSEÑOR, I.M.; MATOS, S.M.A.; FONSECA, M.J.M.; GRIEP, M.H.; CHOR, D. Eating patterns in the Brazilian Longitudinal Study of Adult Health (ELSA-Brasil): an exploratory analysis. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 32, n. 5, p.1-14, 2016.

CARLUCCI, D. Evaluating and selecting key performance indicators: an ANP-based model. **Measuring Business Excellence**, v. 14, n. 2, p. 66-76, 2010.

CASTRO, P.; LOPES, J.D.S. **Recuperação e conservação de nascentes**. Viçosa, MG: CPT, 2001. 84p.

CETRULO, T. B.; MOLINA, N. S.; MALHEIROS, T. F. Indicadores de sustentabilidade: proposta de um barômetro de sustentabilidade estadual. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 1, n. 30, p.33-45, 2013.

CHONG, N.; BACH, P. M.; MOILLERON, R.; BONHOMME, C.; DEROUBAIX, J. F. Use and utility: exploring the diversity and design of water models at the science-policy interface. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 12, p. 983–101, 2017.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1974. 149p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 190 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução Conama no 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília: MMA, 2005.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL - COPAM. **Deliberação normativa conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamentos de efluentes, e dá outras providências. Belo Horizonte: COPAM, 2008. Disponível em:  
<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8151>. Acesso em: 15 nov. 2018.

CORNESCU, V.I.; ADAM, R. Considerations regarding the role of indicators used in the analysis and assessment of sustainable development in the E.U. **Procedia Economics and Finance**, v. 8, p.10-16, 2014.

COSTA, R. C. A.; PEREIRA, G. T.; PISSARRA, T. C. T.; SIQUEIRA, D. S.; FERNANDES, L. F. S.; VASCONCELOS, V.; FERNANDES, L. A.; PACHECO, F. A. L. Land capability of multiple-landform watersheds with environmental land use conflicts. **Land Use Policy**, v. 81, n. 6, p. 689–704, 2019.

CURVELLO, R. T.; BATISTA, G. T.; TARGA, M. S. Estudo dos impactos da ocupação humana na microbacia do rio Batedor na Serra da Mantiqueira no município de Cruzeiro, SP, Brasil. **Ambiente & Água**, v. 3, n. 1, p. 91–107, 2008.

DEPARTAMENTO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ASSUNTOS ECONÔMICOS E SOCIAIS - UNDESA. **Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies**. 3.ed. New York: UN Department of Economic and Social Affairs, 2007.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DOS ESTADO DE MINAS GERAIS - EMATER. **Parâmetros básicos de bacias hidrográficas**. Belo Horizonte: Emater, 2014. 24p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sumula da X reunião técnica de levantamento de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1979. 83 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA.  
**Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília: Embrapa, 2013.  
353p.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE  
SANTA CATARINA - EPAGRI. **Plano de gestão e gerenciamento da bacia  
do Rio Araranguá**: zoneamento da disponibilidade e da qualidade hídrica:  
análise das características físicas. Florianópolis, SC: Epagri, 1997.

EVANS, G. W; COHEN, S. Environmental Stress. In: STOKOLS, D.; ALTMAN,  
I. **Handbook of Environmental Psychology**. New York: John Wiley & Sons,  
1987. Cap. 15. p. 571-602.

FEICK, R. D.; HALL, G. B. Balancing consensus and conflict with a GIS-based  
multi-participant, multi-criteria decision support tool. **GeoJournal**, v. 53, n. 4, p.  
391–406, 2002.

FERRAZ, I C.; ROCHA, T.C.F.; GIACOMINI, I.B.; BEATO.C.E.; FRANCHI, N.;  
AURÉLIO,A.L. **Indicadores ambientais para a gestão de recursos hídricos  
em São Paulo**. 2011. Disponível em:  
<<https://www.iwra.org/member/congress/resource/PAP00-6069.pdf>>. Acesso  
em: 25 mar. 2019.

GALLOPÍN, G.C. **Indicators and their use**: information for decision making:  
sustainability indicators. London, UK: Wiley, 1997. ISBN 978-0-415-34037-3.

GLEICK, P. H. **The world's water. 2000-2001**: report on freshwater resources.  
[S.l.]: Island Press, 2000. 315p.

GRAVELIUS, H. Grundrifi der gesamten gewcisserkunde: Band I: Flufikunde.  
In: \_\_\_\_\_. **Compendium of hydrology**: rivers.Geoschen, Berlin: [s.n.], 1914.

GRAYMORE, M. L.M.; SIPE, N. G.; RICKSON, R. E.. Regional sustainability:  
how useful are current tools of sustainability assessment at the regional  
scale?. **Ecological Economics**, v. 67, n. 3, p.362-372, 2008.

GUIDOLINI, J. F.; OMETTO, J.P.B.; GIAROLLA,A.; TOLEDO, P.M., VALERA,  
C.A. Legal basis for water resources management in Brazil: case study of Rio  
Grande Basin. **World Academy Of Science, Engeneering And Technology**,  
v. 12, n. 3, p.268-274, 2018a.

GUIDOLINI, J.; GIAROLLA, A.; TOLEDO, P.; VALERA, C.; OMETTO, J. Water  
sustainability at the River Grande Basin, Brazil: an approach based on the  
barometer of sustainability. **International Journal of Environmental Research  
and Public Health**, v. 15, n. 11, p. 2582-2597, 2018b.

GLOBAL WATER PARTNERSHIP - GWP. **Catalyzing change: a handbook for developing Integrated Water Resources Management (IWRM) and water efficiency strategies.** Sweden: GWP, 2004.

HIRUMA, S. T.; PONÇANO, W. L. Densidade de drenagem e sua relação com fatores geomorfológicos na área do alto rio Pardo, SP e MG. **Revista do Instituto Geológico**, v. 15, n. 1, p. 49–57, 1994.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V.; OLIVEIRA JUNIOR, G. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering And Science**, v. 1, n. 5, p.83-90, 2015.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. **Nihon Ringakkai Shi/Journal of the Japanese Forestry Society**, v. 37, n. 6, p. 257–262, 1955.

HUANG, LU.; WU, J.; YAN, L. Defining and measuring urban sustainability: a review of indicators. **Landscape Ecology**, v. 30, p.1175-1193, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Indicadores de desenvolvimento sustentável: Brasil 2004.** Rio de Janeiro: IBGE, 2004. 387 p. (Estudos & Pesquisas: Informação Geográfica n. 4).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Diagnóstico da situação dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG) – SP/MG:** relatório síntese R3. São Paulo: IPT, 2008. (Relatório Técnico nº 96.581-205).

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Benefícios econômicos da expansão do saneamento brasileiro.** Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/datafiles/uploads/estudos/pesquisa7/pesquisa7.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2018.

JOHN WILSON, J.S.; CHANDRASEKAR, N.; MAGESH, N.S. Morphometric analysis of major sub-watersheds in Aiyar and Karai Pottanar Basin, central Tamil Nadu, India using remote sensing and GIS techniques. **Journal of Industrial Engineering and Management Science**, v. 2, n., p. 8–15, 2012.

KABITE, G.; GESSESSE, B. Hydro-geomorphological characterization of Dhidhessa River Basin, Ethiopia. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 6, n. 2, p.175-183, 2018.

KOONTZ, T. M. We finished the plan, so now what? impacts of collaborative stakeholder participation on land use policy. **Policy Studies Journal**, v. 33, n. 3, p. 459–481, 2005.

KRONEMBERGER, D. M. P.; CARVALHO, C. N.; CLEVELÁRIO JÚNIOR, J. Indicadores de sustentabilidade em pequenas bacias hidrográficas: uma aplicação do “Barômetro da Sustentabilidade” à Bacia do Jurumirim (Angra dos Reis, RJ). **Revista Geochimica Brasiliensis**, v. 18, n. 2, 86-92, 2004.

KRONEMBERGER, D. M. P.; CLEDEVÁRIO JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, J.A.S.; COLLARES, J.E.R.; SILVA, L.C.D. Desenvolvimento sustentável no Brasil: uma análise a partir da aplicação do barômetro da sustentabilidade. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 20, n. 1, p.25-50, 2008.

LANER, D.; ZOBOLI, O.; RECHBERGER, H. Statistical entropy analysis to evaluate resource efficiency: phosphorus use in Austria. **Ecological Indicators**, v. 83, p.232-242, 2017.

LATTIN, J.; CARROLL, D.; GREEN, P.E. **Análise de dados multivariados**. São Paulo: CENAGE Learning, 2011.

LIMA, W. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2.ed. Piracicaba: Departamento de Engenharia Florestal, 2008. 245 p.

LIU, W.; CUI, J. Entropy coefficient method to evaluate the level of sustainable development of China's sports. **International Journal Of Sports Science and Engineering**, v. 2, n. 2, p.72-78, 2008.

LORENZON, A. S.; FRAGA, M. D. S.; MOREIRA, A. R.; ULIANA, E. M.; DAVID, D.; ANTONIO, C.; SOARES, A. Influência das características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Benevente nas enchentes no município de Alfredo Chaves-ES. **Ambiente & Água**, v. 10, n. 1, p. 1–12, 2015

LUCENA, A. D.; CAVALCANTE, J. N.; CÂNDIDO, G. A. Sustentabilidade do município de João Pessoa: uma aplicação do barômetro da sustentabilidade. **Revista Brasileira de Gestao e Desenvolvimento Regional**, v. 7, n. 1, p. 19, 2011.

MA, L.; ZHAO, J. H.; HONG, M.; CHEN, L. L. Application of set pair analysis model based on entropy weight for comprehensive evaluation of water resources carrying capacity. **Applied Mechanics and Materials**, n.195/196, p.764–769, 2012.

MARZALL, K.; ALMEIDA, J. Indicadores de sustentabilidade para agroecossistemas: estado da arte, limites e potencialidades de uma nova ferramenta para avaliar o desenvolvimento sustentável. **Cadernos de Ciência Tecnologia**, v.17, p.41–59, 2000.

MEGDAL, S.; EDEN, S.; SHAMIR, E. Water governance, stakeholder engagement, and sustainable water resources management. **Water**, n.9, p.190-197, 2017.

MENDONÇA, S. M.; FELZEMBURGH, R. D. M.; SANTOS, J. B. Mortalidade neonatal no Brasil no período de 2004 a 2014. **Revista Eletrônica Acervo Saúde**, n.11, v.2, p.142, 2018.

MENEZES, J.P.; BITTENCOURT, R.P.; FARIAS, M.S.; BELLO, I.P.; FIA, R.; OLIVEIRA, L.F.C. Relationship between patterns of use and occupation of soil and water quality in an urban watershed. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n.3, p. 519-534, 2016.

MILLER, V.C. **A quantitative geomorphologic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee**. New York: Columbia University Department of Geology, 1953.

MINAS GERAIS. FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Ferramenta de consulta do PIB dos municípios do Estado de Minas Gerais**. 2015. Disponível em: <<http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/servicos/81-servicos-cei/58-produto-interno-bruto-de-minas-gerais>>. Acesso em: 17 jan. 2019.

MOLDAN, B.; JANOUŁKOVÁ, S.; HÁK, T. How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets. **Ecological Indicators**, v. 17, p.4-13, 2012

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL- ONU BR. **A agenda 2030**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acesso em: 29 ago. 2018.

NERI, M.C. **Desigualdade de renda na década**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, Centro de Políticas Sociais, 2011. Disponível em: [http://www.fgv.br/cps/bd/DD/DD\\_Neri\\_Fgv\\_TextoFim3\\_PRINC.pdf](http://www.fgv.br/cps/bd/DD/DD_Neri_Fgv_TextoFim3_PRINC.pdf). Acesso em: 15 nov. 2018.

NI, X.; WU, Y.; WU, J.; LU, J.; WILSON, P. C. Scenario analysis for sustainable development of Chongming Island: water resources sustainability. **Science of The Total Environment**, v.439, p.129–135, 2012.

OLIVEIRA, L.F.C.; CALIL, P.M.; RODRIGUES, C.; KLIEMANN, J.H.; OLIVEIRA, V. A. Potencial do uso dos solos da bacia hidrográfica do alto rio Meia Ponte, Goiás. **Ambiente & Água**, v. 8, n. 1, p. 222-238, 2013.

ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD - OMS. **Guías para la calidad del agua potable**. Genebra: OMS, 2006. 195 p.

ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO - ODCE. **Governança dos recursos hídricos no Brasil**. Paris: OECD Publishing, 2015.

OLIVEIRA, T. M. B. F.; DI SOUZA, L.; CASTRO, S. S. L. Dinâmica da série nitrogenada nas águas da Bacia Hidrográfica Apodi/Mossoró - RN - Brasil. **Eclética Química**, v.34, p.17-26, 2009.

PAIVA, R. F. P. S.; SOUZA, M. F. P. Associação entre condições socioeconômicas, sanitárias e de atenção básica e a morbidade hospitalar por doenças de veiculação hídrica no Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 34, n. 1, p.1-11, 2018.

PINTÉR, L.; HARDI, P.; BARTELMUS, P. **Sustainable development indicators: proposals for a way forward**. I Winnipeg: IISD, 2005.

PIRES, A.; MORATO, J.; PEIXOTO, H.; BOTERO, V.; ZULUAGA, L.; FIGUEROA, A. Sustainability assessment of indicators for integrated water resources management. **Science of the Total Environment**, v.578, p.139–147, 2017.

PISSARRA, T. C. T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A. S. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do córrego Rico, Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 297-305, 2004.

PISSARRA, T. C. T.; VALLE JUNIOR, R. F.; SANCHES FERNANDES, L. F.; VALERA, C. A.; PACHECO, F. A. L. Land degradation: multiple environmental consequences and routes to neutrality. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 5, p. 79–86, 2018.

PRESCOTT-ALLEN, R. **Barometer of sustainability: measuring and communicating wellbeing and sustainable development**. Cambridge: IUCN, 1997.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO - PNUD; INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA E APLICADA - IPEA; FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Atlas de desenvolvimento humano do Brasil de 2013**. 2013. Disponível em: <http://atlasbrasil.org.br/2013/pt/>. Acesso em: 10 jan. 2019.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 3.0: Série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil**. Disponível em: <http://mapbiomas.org/>. Acesso em: 10 fev. 2019.

- RAHAMAN, S.; AJEEZ, S.A.; JEGANKUMAR, R. Prioritization of sub watershed based on morphometric characteristics using Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Geographical Information System: a study of Kallar Watershed, Tamil Nadu. **Aquatic Procedia**, v. 4, p.1322-1330, 2015.
- RAI, P. K.; MISHRA, V. N.; MOHAN, K. A study of morphometric evaluation of the Son basin, India using geospatial approach. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 7, p.9-20, 2017.
- RIBEIRO, J. C.; SALOMÃO, F. X. T. Abordagem morfopedológica aplicada ao diagnóstico e prevenção de processos erosivos na bacia hidrográfica do alto rio da casca, MT. **Geociências**, v. 22, n. 1, p. 83-95, 2003.
- ROCHA, J.S.M.; KURTZ, S.M.J.M. **Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas**. 2.ed. Santa Maria: UFSM, 2001. 530p.
- RODRIGUES, K.; RIPPEL, R. Desenvolvimento sustentável e técnicas de mensuração. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 4, n. 3, p.73-88, 2015.
- ROGERS, P. P.; LIAMAS, R.; MARTÍNEZ-CORTINA, L. (Eds.) **Water crisis: myth or reality?** London: Fundación Marcelino Botín; Taylor & Francis, 2006. 331p.
- ROSSI, M.; PFEIFER, R.M. Remoção de material erodido dos solos de pequenas bacias hidrográficas no Parque Estadual da Serra do Mar em Cubatão (SP). **Bragantia**, Campinas, v. 58, n.1, p.141-156, 1999.
- SAATY, T. L. **Mathematical principles of decision making**. Pittsburgh: RWS, 2013.
- SALVATO, M. A. FERREIRA, P. C. G.; DUARTE, A. J. M. O impacto da escolaridade sobre a distribuição de renda. **Estudos Econômicos**, São Paulo, v. 40, n. 4, p.753-781, 2010.
- SANTOS, A. M.; TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; DIAS, N. W. Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil. **Ambiente e Água**, Taubaté, v. 7, n. 3, p. 195-211, 2012.
- SHANNON, C. E. A. Mathematical theory of communication. **Bell System Technical Journal**, v. 27, n. 4, p.623-656, 1948.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, n. 5, p. 597- 646, 1956.

SILVA, A. M.; MELO, C. R.; **Bacia hidrográfica: teoria**. Lavras, UFLA, 2006. Disponível em: <[http://www.deg.ufla.br/irrigação/ Disciplinas/ENG%20170/hidrologia\\_eng\\_170.htm](http://www.deg.ufla.br/irrigação/ Disciplinas/ENG%20170/hidrologia_eng_170.htm). Acesso em 03 out. 2018.

SILVA JUNIOR, R. D.; FERREIRA, L. C. Sustentabilidade na era das conferências sobre meio ambiente e desenvolvimento: um olhar para ecologia e economia. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 16, n. 1, p.1-18, 2013.

SILVA, V. A.; OLIVEIRA, L. T.; ESTEVAM, J. P. S.; SIQUEIRA, H. E.; VALLE JUNIOR, R. F. Análise morfométrica e definição do potencial de uso do solo da microbacia do córrego do Neca, em Uberaba-MG. **Fazu em Revista**, v. 1, n. 10, p. 13–16, 2003.

SINGH, K.N. **Quantitative analysis of landform and settlement distribution in sothern upland of eastern Uttar Pradesh (India)**. Varanasi: Vimal Prakashan, 1980.

SIQUEIRA, H. E.; GUIDOLINI, J. F.; ANTUNES, D. H.; OLIVEIRA, F. P.; VALLE JUNIOR, R. F. Diagnóstico da qualidade da água em área de conflito de uso do solo na microbacia Mangabeira, Uberaba-MG. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 14, p. 1164–1178, 2012a.

SIQUEIRA, H. E.; TIBERY, L. R.; GUIDOLINI, J. F.; VALLE JUNIOR, R. F.; RODRIGUES, V. A. Análise morfométrica e definição do potencial de uso do solo da microbacia do Rio Veríssimo, Veríssimo - MG. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 15, p. 2236–2246, 2012b.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, n. 11, p. 1117–1142, 1952.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913–920, 1957.

STRAHLER, A.N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: CHOW, V. T. (Ed.). **Handbook of applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1964. p. 439-476.

SUN, T.; ZHANG, H.; WANG, Y. The application of information entropy in basin level water waste permits allocation in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 70, p.50-54, 2013.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, v.20, p.137-156, 2007.

TOUMI, O.; GALLO, J.; REJEB, J. B. Assessment of Latin American sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p.878-885, 2017.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p.7-16, 2008.]

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Recursos hídricos no século XXI**. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 328 p.

VALERA, C. A.; VALLE JUNIOR, R. F.; VARANDAS, S. G. P.; SANCHES FERNANDES, L. F.; PACHECO, F. A. L. The role of environmental land use conflicts in soil fertility: a study on the Uberaba River basin, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 562, p. 463–473, 2016.

VALERA, C. A.; PISSARRA, T. C. T.; MARTINS FILHO, M. V.; VALLE JUNIOR, R. F.; SANCHES FERNANDES, L. F.; PACHECO, F. A. L. A legal framework with scientific basis for applying the ‘polluter pays principle’ to soil conservation in rural watersheds in Brazil. **Land Use Policy**, v. 66, n. 4, p. 61–71, 2017.

VALERA, C. A.; PISSARRA, T. C. T.; MARTINS FILHO, M. V.; VALLE JÚNIOR, R. F.; OLIVEIRA, C. F.; MOURA, J. P.; SANCHES FERNANDES, L. F.; PACHECO, F. A. L. The buffer capacity of riparian vegetation to control water quality in anthropogenic catchments from a legally protected area: a critical view over the brazilian new Forest Code. **Water**, v. 11, n. 3, p. 549-555, 2019.

VALLE JUNIOR, R.F. **Diagnóstico de áreas de risco de erosão e conflito de uso dos solos na bacia do rio Uberaba**. 2008. 233p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Jaboticabal, 2008.

VALLE JUNIOR, R.F.; ABDALA, V.L.; VAL, B.H.P.; CARMO, D.A.; SOUZA, M. A. C. Diagnóstico do uso potencial do solo e conflito ambiental na Microbacia Hidrográfica do Rio Veríssimo, Veríssimo - MG. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 12, p. 1–10, 2011.

VALLE JUNIOR, R.F.; GALBIATTI, J.A.; PISSARRA, T.C. Caracterização morfométrica da Bacia do Rio Uberaba e determinação do uso potencial do solo, Uberaba-MG. **Caminhos da Geografia**, v. 13, n. 44, p. 60–74, 2012.

VALLE JUNIOR, R.F., GALBIATTI, J.A., PISSARRA, T.C.T., M. F. Diagnosis of conflict of land use and occupancy of river basin Uberaba. **Global Science and Technology**, v.6, n.1, p. 40–52, 2013.

VAN BELLEN, H. M. V. Desenvolvimento sustentável: uma descrição das principais ferramentas de avaliação. **Ambiente & Sociedade**, v. 8, n. 1, 2004.

VEIGA, J. E. Indicadores de sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p.39-52, 2010.

VICINI, L.; SOUZA, A.M. **Análise multivariada da teoria à prática**. Santa Maria: UFSM, 2005.

VICTORA, C.G. Intervenções para reduzir a mortalidade infantil pré-escolar e materna no Brasil. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 4, n. 1, p.3-69, 2001.

VIDAL, T.F.; CAPELO NETO, J. Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 4, p.402-407, 2014.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975. 245p.

WESCOAT, J. L. Water resources and sustainable water management. **International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences**, p.437-442, 2015.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Guidelines for drinking water quality**. 2.ed. Geneva: WHO, 1996. v.1. 1234p.

WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME - WWAP. **The United Nations World Water Development report: water for people water for life**. Paris: UNESCO, 2003.

ZAVADSKAS, E. K.; TURSKIS, Z.; VILUTIENE, T. Multiple criteria analysis of foundation installment alternatives by applying Additive Ratio Assessment (ARAS) method. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 10, n. 3, p. 123-141, 2010.

ZHANG, Y. J.; LI, A. J.; FUNG, T. Using GIS and multi-criteria decision analysis for conflict resolution in land use planning. **Procedia Environmental Sciences**, v. 13, n. 2011, p. 2264–2273, 2012.

ZHAO, J.; JI, G.; TIAN, Y.; CHEN, Y.; WANG, Z. Environmental vulnerability assessment for mainland China based on entropy method. **Ecological Indicators**, 91, 410–422, 2018.

ZHI-HONG, ZOU.; YI, YUN.; JING-NAN, SUN. Entropy method for determination of weight of evaluating in fuzzy synthetic evaluation indicators for water quality assessment. **Journal Of Environmental Sciences**, v. 18, n. 5, p.1020-1023, 2006.

## APÊNDICE A – DIAGNÓSTICO FÍSICO-CONSERVACIONISTA E CONDIÇÃO DE SUSTENTABILIDADE DA BACIA DO RIO GRANDE

Tabela A1 - Parâmetros morfométricos lineares gerais, de forma, de relevo e de drenagem utilizados para a Bacia do Rio Grande.

		Unidades	Formula	Referências
Características Gerais	A	km <sup>2</sup>	Calculado a partir do limite da bacia-SIG.	Schumm (1956)
	P	km	Calculado a partir do limite da bacia-SIG.	Schumm (1956)
	Lax	km	Calculado a partir do rio principal-SIG Maior largura da bacia Altura média da bacia	Horton (1945)
	L	km		Schumm (1956)
	Am	km		Schumm (1956)
Características Geométricas	F	adimensional	$F = A/Lax^2$	Horton (1945)
	Kc	adimensional	$Kc = 0,2841 * P/A^{0.5}$	Gravellus (1941)
	Ic	adimensional	$Ic = 12,57 * A/P^2$	Strahler (1964)
Características de Relevo	Hmax	m	Calculado a partir do MDE-SIG.	Santos <i>et al.</i> (2012)
	Hmed	m	Calculado a partir do MDE-SIG.	Santos <i>et al.</i> (2012)
	Hmin	m	Calculado a partir do MDE-SIG.	Santos <i>et al.</i> (2012)
	Δm	m	Hmax-Hmin	Santos <i>et al.</i> (2012)
	LCN	m	Calculado a partir do MDE-SIG	Vilela e Matos (1975)
	Dm	%	$(\sum LCN * \Delta h/A) * 100^{-1}$	Vilela e Matos (1975)
	Rr	m.m <sup>-1</sup>	$Rr = \Delta m/Lax$	Strahler (1964)
	CR	km.km <sup>-2</sup>	$CR = 1/4 * Dd$	Vilela e Matos (1975)
Características de Drenagem	LCP	km	Calculado a partir da rede de drenagem- SIG	Horton (1945)
	CT	km	Calculado a partir da rede de drenagem- SIG	Horton (1945)
	Ctalv	km	Calculado a partir do rio principal-SIG $Dd = CT/A$ $Cm = (1/Dd)$	Horton (1945)
	Dd	km.km <sup>-2</sup>		Horton (1945)
	Cm	km <sup>2</sup> .km <sup>-1</sup>		Santos <i>et al.</i> (2012)
	SIN	adimensional	$SIN = LCP/CT$	Alves e Castro (2003)
	Gc	m.km <sup>-1</sup>	$Gc = Hmax/LCP$	Horton (1945)
	Is	%	$Is = (100 * (LCP - Ctalv)) / LCP$	EPAGRI (1997)
	Nu1	number (n <sup>o</sup> )	Número total de canais de 1 <sup>o</sup> ordem	Horton (1945)
	Dh	stream/km <sup>2</sup>	$Nu1/A$	Horton (1945)
	Ord	adimensional	Organização hierárquica	Strahler (1964)

Tabela A2 - Referência e descrição dos indicadores de sustentabilidade da dimensão ambiental, separados por tema.

Dimensão ambiental		
Indicador	Referência	Descrição
Tema 1: Saneamento Ambiental		
Quantidade estimada de esgoto produzido por ano (m <sup>3</sup> / ano)	Quantidade de esgoto produzido < 5 foi considerado sustentável (IPT, 2008).	Consideramos o censo do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) de 2000. Além disso, adotamos que o consumo médio de água é de (175 litros / habitante / dia) e a razão água / proporção de água é de 0,85 e 365 dias por ano.
Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domésticos produzidos por ano (toneladas / ano)	Quantidade de resíduos sólidos produzidos <5 foi considerado sustentável (IPT, 2008).	Foi considerado o censo de 2000 do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Adotamos uma produção média de resíduos sólidos de 0,80 kg / hab / dia e 365 dias por ano.
Proporção de municípios com tratamento de esgotos em ETE (Estação de Tratamento de Esgotos) (%)	Meta estabelecida para este trabalho: 100	Indicador que reflete os municípios que tratam o esgoto em ETE.
Proporção de municípios com aterro (%)	Meta estabelecida para este trabalho: 100	Indicador que reflete os municípios que destinam os resíduos sólidos corretamente em aterros sanitários.
Proporção de municípios com coleta de lixo em 100% dos domicílios	Meta estabelecida para este trabalho: 100	Indicador reflete a coleta de lixo nos municípios.
Tema 2: Água (qualidade / quantidade)		
A proporção de cursos d'água monitorados e classificados como ótimo / excelente / bom (%).	Foram considerados sustentáveis > 90% de monitoramento dos cursos d'água classificados como excelente / ótimo / bom / (IPT, 2008).	O indicador reflete a qualidade da água obtida a partir do IQA (Índice de Qualidade de Água).
Proporção do rio com monitoramento da qualidade de água (%).	Foi considerado sustentável > 60% (IPT, 2008).	Abrangência do monitoramento da qualidade da água superficial.
Número de fluviômetros instalados (nº).	Fluviômetros ajudam a monitorar e controlar o fluxo água. Sem saber a quantidade de água disponível para uso, a gestão é prejudicada. Assim, foi adotado como sustentável acima de 16 fluviômetros instalados por UGH (Unidade de Gestão Hídrica) (IPT, 2008).	Indicador que reflete o monitoramento do fluxo de água.

continua

Tabela A2 – Conclusão.

Dimensão ambiental		
Referência	Descrição	
Tema 2: Água (qualidade / quantidade)		
Número de poços monitorados (n°)	Abrangência do monitoramento de águas subterrâneas. Quanto maior o monitoramento, melhor o conhecimento sobre a qualidade das águas subterrâneas. Acima de 16 poços, foi considerado sustentável (IPT, 2008).	Abrangência do monitoramento da qualidade da água subterrânea.
Estimativa da quantidade de água tratada consumida por ano (m³ / ano).	Foi considerado valor sustentável <10 x 106 (IPT, 2008).	O indicador expressa a quantidade estimada de água tratada necessária para o consumo humano por ano. É obtido pela multiplicação entre consumo diário de água per capita X número de dias no ano X número total de habitantes.
Tema 3: Vegetação		
Proporção de áreas protegidas por Unidades de Conservação (%).	Unidades de Conservação (UCs) são importantes para a manutenção da biodiversidade e conservação do solo e água. Para este trabalho, foram consideradas sustentáveis > 50% de áreas protegidas por UCs (IPT, 2008).	Importante indicador de conservação da biodiversidade, solo e água.
Proporção da área com vegetação nativa preservada (%).	Consideramos acima de 50% sustentável (IPT, 2008).	Indicador que reflete o quanto ainda existe de vegetação nativa, com especial atenção para as áreas de preservação permanente (fundamentais para a manutenção da qualidade e disponibilidade de água).
Tema 4: Institucional		
Número de instrumentos de gestão da PNRH (Política Nacional de Recursos Hídricos) implementados (n°).	Meta estabelecida para este trabalho: 5	Os instrumentos da PNRH são: (1) plano de recursos hídricos, (2) enquadramento dos corpos de água; (3) concessão do direito de uso da água, (4) a cobrança pelo uso dos recursos hídricos (5) sistema de informação sobre os recursos hídricos. Compensação para os municípios, embora continue a aparecer como um instrumento da PNRH, teve suas disposições vetadas no texto da PNRH. Portanto, este instrumento não foi considerado neste estudo.

Tabela A3 - Referência e descrição dos indicadores de sustentabilidade da dimensão econômica, separados por tema.

Dimensão econômica		
Indicador	Referência	Descrição
Tema 5: Indústria		
Número de estabelecimentos industriais (nº).	Quantidade > 3000 foi considerado insustentável (IPT, 2008).	O indicador reflete o número de indústrias na BHRG (Rio Grande Basin). Indústrias movimentam a economia, mas causam grande pressão sobre os recursos hídricos. Além disso, são potenciais fontes geradoras de resíduos sólidos, efluentes líquidos e poluidores/contaminantes da água, do solo e do ar.
Tema 6: Exploração de Água		
Quantidade de operações de extração de água mineral (nº).	Quantidade <10 foi considerado sustentável (IPT, 2008).	Exploração de água mineral para suprir as necessidades da população.
Tema 7: Cultivo		
Número de estabelecimentos agrícolas (nº).	Quantidade > 4000 foi considerado insustentável (IPT, 2008).	Indicador que reflete o número de estabelecimentos agropecuários inseridos na BHRG. Grande parte da bacia é usada para fins agropecuários. A agropecuária impulsiona a economia, mas causa grande pressão sobre os recursos hídricos, demandando grande quantidade de água para a produção. Além disso, pode impactar negativamente, devido às perdas excessivas do solo, poluição difusa, contaminação por excesso fertilizantes, agrotóxicos, etc.
Tema 8: Potencial Hidrelétrico		
Capacidade Hidrelétrica Instalada (kW)	Capacidade > 1 milhão foi considerada insustentável (IPT, 2008)	O indicador reflete a capacidade de geração hidrelétrica na BHRG. A geração de energia hidrelétrica movimenta a economia, mas requer gestão integrada, participativa e compartilhada para gerenciar os conflitos que surgem devido à implantação e operação das usinas, para não prejudicar os múltiplos usos da água.

Tabela A4 - Referência e descrição dos indicadores de sustentabilidade da dimensão social separados por tema.

Dimensão social		
Indicador	Referência	Descrição
Tema 9: Desenvolvimento Humano		
Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) (adimensional)	Neste estudo, valores > 0.800 do IDHM foram considerados sustentáveis (IPT, 2008).	O indicador considera a longevidade, renda e educação.
Tema 10: Saúde		
Número anual de registros de pessoas hospitalizadas com doenças de veiculação hídrica (n°).	Meta estabelecida para este trabalho: 0	O indicador reflete o número de pessoas que foram internadas por ingestão de água de qualidade inadequada. Foram consideradas as seguintes doenças: cólera; febre tifóide e febre paratifóide; amebíase; doenças diarreicas agudas (diarreia e gastroenterite de origem infecciosa presumível e outras doenças intestinais infecciosas); leptospirose e hepatites A e E.
Tema 11: Habitação		
Proporção de municípios ligados à rede pública de abastecimento de água (%)	Meta estabelecida para este trabalho: 100%	O indicador reflete o acesso dos municípios da BHRG à rede pública de abastecimento de água.
Proporção de municípios ligados à rede de coleta de esgotos (%)	Meta estabelecida para este trabalho: 100%	O indicador reflete o acesso dos municípios da BHRG à rede coletora de esgoto.
Tema 12: População		
Taxa Geométrica de Crescimento Anual da população (% ao ano)	A ineficiência da gestão territorial aliada ao crescimento populacional acelerado pode dificultar o percurso rumo à sustentabilidade. Assim, as taxas de > 1,8 foram consideradas insustentáveis (IPT, 2008).	Indicador expressa o crescimento da população.

Tabela A5 - Valor real dos indicadores de sustentabilidade (EDr) selecionados para a BHRG - Estado de Minas Gerais

Indicador	GD1	GD2	GD3	GD4	GD5	GD6	GD7	GD8
1 Proporção do rio em que a água é classificada por meio de monitoramento	50,72	14,51	99,97	24,94	36,37	0	52,84	76,38
2 Número de estabelecimentos industriais	177	1987	2552	1779	2231	2436	1037	1749
3 Quantidade estimada de esgoto produzido por ano	5,58	27,62	38,12	23,05	28,41	20,89	15,91	24,11
4 Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domésticos produzidos por ano	29,98	148,56	205,01	123,99	152,77	112,36	85,59	129,67
5 Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM)	0733	0743	0,78	0765	0756	0775	0779	0785
6 Número anual de registros de hospitalizações por doenças de veiculação hídrica	224	677	1183	586	945	556	1220	1176
7 Proporção de municípios ligados à rede pública de abastecimento de água	97,32	95,44	98,62	97,34	97,46	97,82	99,45	97,47
8 Proporção de municípios ligados à rede coletora de esgoto	76,95	76,43	88,31	91,45	91,28	91,61	93,78	84,65
9 Proporção de municípios com tratamento de esgotos em ETE (Estação de Tratamento de Esgoto)	4,76	6,9	16,67	8,7	0	4,76	5,56	22,22
10 Proporção de municípios em que 100% dos domicílios têm coleta de lixo	28,57	41,38	52,78	21,74	71,79	71,43	16,67	77,78
11 Proporção de municípios com aterro sanitário	9,52	10,34	16,67	17,39	20,51	19,05	33,33	38,89
12 Número de poços monitorados	0	18,8	0	0	0	0	0	0
13 Proporção de cursos d' água monitorados e classificados como ótimo / excelente / bom	28,12	0	9,76	33,57	20,22	4,6	14,17	9,52
14 Proporção de áreas protegidas por Unidades de Conservação (UCs)	13,29	1	0	23,82	6,33	0	0,04	0

continua

Tabela A5 – Conclusão.

Indicador	GD1	GD2	GD3	GD4	GD5	GD6	GD7	GD8
15 Número de instrumentos da PNRH (Política Nacional de Recursos Hídricos) implementados	1	1	1	2	1	1	1	1
16 Taxa Geométrica de Crescimento Anual (TGCA)	0,34	1,34	1,35	1,67	1,5	1,52	1,47	1,12
17 Quantidade de operações de exploração de água mineral	14	19	21	52	38	45	12	18
18 Capacidade Hidrelétrica Instalada	143220	244640	10190	9100	11780	51320	1705200	4833200
19 Estimativa da quantidade de água tratada consumida por ano	6560000	32500000	44850000	27120000	33420000		18720000	28360000
20 Número de fluviômetros instalados	4	1	0	0	0		0	1
21 Proporção de vegetação nativa preservada	7,18	1,55	0,98	6,85	8,65		1,26	2,76
22 Número de estabelecimentos agrícolas	1114	2813	5977	2938	3116		2615	4385

Tabela A6 - Valor real dos indicadores de sustentabilidade (EDr) selecionados para a BHRG - Estado de Minas Gerais.

Indicador	UGRHI01	UGRHI04	UGRHI08	UGRHI09	UGRHI12	UGRHI15
1 Proporção do rio em que a água é classificada por meio de monitoramento	78,55	77,79	21,68	75,56	72,12	70,88
2 Número de estabelecimentos industriais	165	3338	3471	4891	725	3889
3 Quantidade estimada de esgoto produzido por ano	3,32	52,86	33,22	71,67	16,99	59,61
4 Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domésticos produzidos por ano	17,84	284,27	178,64	385,47	91,37	320,58
5 Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM)	0774	0798	0798	0798	0783	0777
6 Número anual de registros de hospitalizações por doenças de veiculação hídrica	85	2040	1001	3085	736	3768
7 Proporção de municípios ligados à rede pública de abastecimento de água	88,79	98,54	99,12	98,11	98,94	97,73
8 Proporção de municípios ligados à rede coletora de esgoto	50,03	93,95	90,37	91,37	80,12	97,08
9 Proporção de municípios com tratamento de esgotos em ETE (Estação de Tratamento de Esgoto)	9,58	44,43	72,6	37,83	44,54	21,56
10 Proporção de municípios com 100% das famílias têm coleta de lixo	100	91,3	59,1	89,47	75	90,62
11 Proporção de municípios com aterro sanitário	66,67	30,43	50	50	50	50
12 Número de poços monitorados	0	11	5	12	3	14
13 Proporção de cursos d' água monitorados e classificados como ótimo / excelente / bom	35,47	15,31	17,56	10,96	8,4	16,52
14 Proporção de áreas protegidas por Unidades de Conservação (UCs)	100	0,66	0,4	1,53	0,01	0,08
15 Número de instrumentos da PNRH (Política Nacional de Recursos Hídricos) implementados	3	3	3	3	3	3
16 Taxa Geométrica de Crescimento Anual (TGCA)	1,96	1,67	1,9	2	1,21	1,65
17 Quantidade de operações de exploração de água mineral	41	39	18	346	8	33

continua

Tabela A6 – Conclusão.

Indicador	UGRHI01	UGRHI04	UGRHI08	UGRHI09	UGRHI12	UGRHI15
18 Capacidade Hidrelétrica Instalada	360	250980	503470	33910	0	0
19 Estimativa da quantidade de água tratada consumida por ano	3900000	62180000	39080000	1577010000	19990000	70130000
20 Número de fluviômetros instalados	1	7	11	10	4	8
21 Proporção de vegetação nativa preservada	51,17	3,78	2,47	2,95	3,05	1,87
22 Número de estabelecimentos agrícolas	92	3396	3457	4649	1860	5690

Tabela A7 - Escala de desempenho dos indicadores associados à escala do BS.

Indicadores de Desenvolvimento Sustentável	Escala do Barômetro de Sustentabilidade				
	0 <= 20	20 <= 40	40 <= 60	60 <= 80	80 <100 =
	Insustentável	Quase Insustentável	Intermediário	Quase Sustentável	Sustentável
Escala de Desempenho do Indicador					
Proporção do rio em que a água é classificada por meio de monitoramento (%)	<30	30 - 50	51-70	71-90	> 90
Número de fluviômetros instalados (nº)	<3	3-5	6-10	11-16	> 16
Estimativa da quantidade de água tratada consumida por ano (m³ / ano)	> 80.10 <sup>6</sup>	60.10 <sup>6</sup> -80.10 <sup>6</sup>	30.10 <sup>6</sup> -60.10 <sup>6</sup>	10.10 <sup>6</sup> - 30.10 <sup>6</sup>	< 10.10 <sup>6</sup>
Proporção de áreas protegidas por Unidades de Conservação - UCs (%)	0	1 – 10	11-25	25 – 50	> 50
Proporção da área com vegetação nativa preservada (%)	<10	10-19	20-39	40-49	> 50
Quantidade estimada de esgoto produzido por ano (10 <sup>6</sup> m³ ano)	> 60	31- 60	21 - 30	5-20	<5
Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domésticos produzidos por ano (ton./ano)	> 350	201-300	51-200	5-50	<5
Taxa Geométrica de Crescimento Anual (a.a)	> 1,80	1,61-1,80	1,21-1,60	0,40 - 1,20	<0,40
Índice de Desenvolvimento Humano Municipal - IDHM (adimensional)	<0,740	0,740-0,759	0,760-0,779	0,780-0,800	<0,800
Proporção do rio em que a água é classificada por meio de monitoramento (%)	<10	10-20	21-40	41-60	> 60
Número de poços monitorizados	<3	3-5	6-10	11-16	> 16
Proporção de municípios com tratamento de esgotos em ETE – Estação de Tratamento de Esgoto (%)	0-74	75-84	85-94	95-99	100
Proporção de municípios em que 100% dos domicílios têm coleta de lixo	<75	75-84	85-94	95-99	100
Proporção de municípios com aterro sanitário (%)	<75	75-84	85-94	95-99	100
Proporção de municípios ligados à rede pública de abastecimento de água (%)	<75	75-84	85-94	95-99	100
Número anual de registros de hospitalizações por doenças de veiculação hídrica (nº)	> 2000	1001-2000	100-1000	1-100	0
Número de instrumentos de gestão da PNRH (Política Nacional de Recursos Hídricos) implementados (nº)	0-1	2	3	4	5
Número de estabelecimentos agrícolas (nº)	> 4000	2001-4000	1001-2000	100-1000	<100
Quantidade de operações de exploração de água mineral (nº)	> 100	40-100	20-39	10-19	<10
Número de estabelecimentos industriais (Nº)	> 3000	2001-3000	1001-2000	200-1000	<200
Capacidade hidrelétrica instalada (KW)	> 1 mi	100mil- 1mi	11mil -99,9 mil	1 -10,9 mil	0 - 9,9 mil

Tabela A8 – Sistema de indicadores e fonte dos dados.

Indicadores	Unidade	Fonte	Tendência Desejável
<b>Subsistema Social</b>			
S1	Rede de abastecimento pública de água (nº. famílias)	Sistema de Informação da Atenção Básica /SIAB(2008-2014)	+
S2	Coleta de lixo (nº. famílias)	Sistema de Informação da Atenção Básica /SIAB(2008-2014)	+
S3	Coleta de esgoto (nº. famílias)	Sistema de Informação da Atenção Básica /SIAB(2008-2014)	+
S4	Ensino Fundamental completo (≥ 18 anos de idade) (%)	Atlas do Desenvolvimento Humano Brasileiro (1991/2000/2010)	+
S5	Água sem tratamento (nº. famílias)	Sistema de Informação da Atenção Básica /SIAB(2008-2014)	-
S6	Mortalidade Infantil (%)	Atlas do Desenvolvimento Humano Brasileiro (1991/2000/2010)	-
S7	Pessoas hospitalizadas com doenças de veiculação hídrica (no.) *	Sistema de Informação da Atenção Básica /SIAB(2008-2014)	-
<b>Subsistema Econômico</b>			
E1	Produto Interno Bruto (R\$ 1.00)	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/IBGE (2008-2014)	+
E2	Renda per capita (R\$)	Atlas do Desenvolvimento Humano Brasileiro (1991/2000/2010)	+
E3	Taxa de atividade (≥18 anos de idade)-%	Atlas do Desenvolvimento Humano Brasileiro (1991/2000/2010)	+
E4	Custo médio de internação (R\$)	Sistema de Informação da Atenção Básica /SIAB(2008-2014)	-
E5	Índice de GINI (adimensional)	Atlas do Desenvolvimento Humano Brasileiro (1991/2000/2010)	-
<b>Subsistema Ambiental</b>			
ENV1	Oxigênio Dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	Agência Nacional de Águas/ANA(2008-2014)	+
ENV2	Coliformes Totais (NMP**/100mL)	Agência Nacional de Águas/ANA(2008-2014)	-
ENV3	Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg.L <sup>-1</sup> )	Agência Nacional de Águas/ANA(2008-2014)	-
ENV4	Fósforo Total (mg.L <sup>-1</sup> )	Agência Nacional de Águas/ANA(2008-2014)	-
ENV5	Nitrato (mg.L <sup>-1</sup> )	Agência Nacional de Águas/ANA(2008-2014)	-
ENV6	Nitrogênio Amoniacal (mg.L <sup>-1</sup> )	Agência Nacional de Águas/ANA(2008-2014)	-

Tabela A9 – Sistema de indicadores e fonte dos dados

Sigla	Indicador/Unidade	Fonte	Tendência Desejável
Subsistema Social			
SOC1	Ensino Fundamental completo ( $\geq$ 18 anos de idade) (%)	Atlas do Desenvolvimento Humano Brasileiro (1991/2000/2010)	+
SOC2	Esperança de vida ao nascer (anos)	Atlas do Desenvolvimento Humano Brasileiro (1991/2000/2010)	+
SOC3	Mortalidade Infantil (%)	Atlas do Desenvolvimento Humano Brasileiro (1991/2000/2010)	-
SOC4	Rede de abastecimento pública de água (% famílias)	Sistema de Informação da Atenção Básica /SIAB(2010-2015)	+
SOC5	Coleta de esgoto (% famílias)	Sistema de Informação da Atenção Básica /SIAB(2010-2015)	+
SOC6	Água sem tratamento (% famílias)	Sistema de Informação da Atenção Básica /SIAB(2010-2015)	-
SOC7	Coleta de lixo (% famílias)	Sistema de Informação da Atenção Básica /SIAB(2010-2015)	+
Subsistema Econômico			
EC1	Índice de GINI (adimensional)	Atlas do Desenvolvimento Humano Brasileiro (1991/2000/2010)	-
EC2	Renda per capita (R\$)	Atlas do Desenvolvimento Humano Brasileiro (1991/2000/2010)	+
EC3	Produto Interno Bruto (R\$ 1.00)	Fundação João Pinheiro (2010-2015)	+
EC4	Taxa de atividade ( $\geq$ 18 anos de idade)-%	Atlas do Desenvolvimento Humano Brasileiro (1991/2000/2010)	+
Subsistema Ambiental			
ENV1	Oxigênio Dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	Agência Nacional de Águas/ANA(2010-2015)	+
ENV2	Coliformes Totais (NMP**/100mL)	Agência Nacional de Águas/ANA(2010-2015)	-
ENV3	Potencial Hidrogeniônico	Agência Nacional de Águas/ANA(2010-2015)	+
ENV4	Demanda Bioquímica de Oxigênio ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	Agência Nacional de Águas/ANA(2010-2015)	-
ENV5	Nitrato ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	Agência Nacional de Águas/ANA(2010-2015)	-
ENV6	Fósforo Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	Agência Nacional de Águas/ANA(2010-2015)	-
ENV7	Vegetação natural preservada (%)	MAPBIOMAS(2010-2015)	-

Tabela A10 – Referência e descrição dos indicadores de sustentabilidade da dimensão social separados por tema.

Dimensão social		
Indicador	Referência	Descrição
Tema 1: Educação		
SOC1 - Ensino fundamental completo ( $\geq 18$ anos de idade) (%)	Meta estabelecida para este estudo 100%.	Pessoas com 18 anos ou mais de idade com ensino fundamental concluído
Tema 2: Saúde		
SOC2 - Esperança de vida ao nascer (anos de idade)	Consideramos sustentável valores $\geq 70$ , com base nos valores máximo e mínimo entre as UGHs (Unidades de Gestão Hídrica) em 2010.	Número médio de anos que um recém-nascido esperaria viver se estivesse sujeito a uma lei de mortalidade.
SOC3 - Mortalidade infantil	Consideramos sustentável valores $\leq 7$ , com base em valores máximo e mínimo entre as UGHs (Unidades de Gestão Hídrica) em 2010	Frequência com que ocorrem os óbitos infantis (menores de um ano) em uma população, em relação ao número de nascidos vivos em determinado ano civil. Expressa-se para cada mil crianças nascidas vivas.
Tema 3: Habitação		
SOC4 - Rede de abastecimento pública de água (% famílias)	Meta estabelecida para este estudo: 100%	Famílias com acesso à rede pública de abastecimento de água
SOC5 - Coleta de esgoto (% famílias)	Meta estabelecida para este estudo: 100%	Famílias com acesso à rede coletora de esgoto
SOC6 - Água sem tratamento (% famílias)	Meta estabelecida para este estudo: 0	Famílias que não têm acesso à água tratada
SOC7 - Coleta de lixo (% famílias)	Meta estabelecida para este estudo: 100%	Famílias que têm o lixo coletado

Tabela A11 – Referência e descrição dos indicadores de sustentabilidade da dimensão econômica separados por tema.

Dimensão econômica		
Indicador	Referência	Descrição
Tema 4: Rendimento		
EC1 - Índice de GINI (adimensional)	Consideramos insustentáveis valores $\geq 0,5$ (IBGE, 2004)	Mostra o grau de concentração da renda
EC2 – Renda per capita (R\$)	Consideramos sustentáveis valores $\geq$ em relação ao salário mínimo brasileiro para os anos 2010 e 2015 (R\$ 510,00 e R\$ 788,00, respectivamente)	Espécie de termômetro do nível de desenvolvimento de um país
EC3 – Produto Interno Bruto (PIB)	Consideramos sustentáveis valores $\geq$ em relação ao maior valor de PIB para o ano de 2010 (R\$160.000,00) e 2015 (R\$129.000,00) para o Estado de Minas Gerais (Fundação João Pinheiro, 2019)	O PIB per capita mede a riqueza potencial da população de um país
Tema 5: Trabalho		
EC4 - Taxa de atividade ( $\geq 18$ anos de idade)-%	Consideramos sustentável taxa $\geq 70\%$ , considerando os valores máximos/mínimos entre as UGHs (Unidades de Gestão Hídrica) para o ano de 2010.	Porcentagem das pessoas economicamente ativas, em relação às pessoas de 18 ou mais anos de idade.

Tabela A12 – Referência e descrição dos indicadores de sustentabilidade da dimensão ambiental separados por tema.

Dimensão ambiental		
Indicador	Referência	Descrição
Tema 6 Qualidade da Água		
ENV1 – Oxigênio Dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	Consideramos sustentáveis valores $\geq 5$ (mg.L <sup>-1</sup> ), segundo a Resolução nº 357 de 1995 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente)	O oxigênio dissolvido é vital para a preservação da vida aquática, já que vários organismos (ex.: peixes) precisam de oxigênio para respirar (BRASIL, 2019)
ENV2 – Coliformes Totais (NMP/100mL)	Consideramos sustentável $\leq 5000$ (NMP/100mL), segundo a Resolução nº 357 de 1995 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente)	Os coliformes totais são grupos de bactérias gram-negativas, que podem ou não necessitar de oxigênio, aeróbias ou anaeróbias, e são associadas à decomposição de matéria orgânica em geral (BRASIL, 2019).
ENV3 – Potencial Hidrogeniônico (pH)	Consideramos sustentáveis, valores entre 6 e 9, segundo a Resolução nº 357 de 1995 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente)	Alterações nos valores de pH podem aumentar o efeito de substâncias químicas que são tóxicas para os organismos aquáticos e afetar o metabolismo dos mesmos (BRASIL, 2019)
ENV4 – Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg.L <sup>-1</sup> )	Consideramos sustentáveis valores $\leq 5$ (mg.L <sup>-1</sup> ), segundo a Resolução nº 357 de 1995 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente)	A Demanda Bioquímica de Oxigênio representa a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica presente na água por meio da decomposição microbiana aeróbia (BRASIL, 2019)
ENV5 – Nitrato (mg.L <sup>-1</sup> )	Consideramos sustentáveis valores $\leq 10$ (mg.L <sup>-1</sup> ), segundo a Resolução nº 357 de 1995 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente)	Os nitratos são tóxicos aos seres humanos e em altas concentrações causam uma doença chamada metahemoglobinemia infantil, que é letal para crianças. Além disso, juntamente com o fósforo, podem causar a eutrofização das águas (BRASIL, 2019).
ENV6 – Fósforo Total (mg.L <sup>-1</sup> )	Consideramos sustentáveis valores $\leq 0,05$ (mg.L <sup>-1</sup> ), segundo a Resolução nº 357 de 1995 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente)	O fósforo é um importante nutriente para os processos biológicos e o seu excesso, juntamente com o nitrogênio, pode causar a eutrofização das águas (BRASIL, 2019)
Tema 7: Vegetação		
ENV7 – Vegetação natural preservada (%)	Consideramos sustentáveis valores $\geq 50\%$ (KRONENBERGER et al., 2004; VALERA et al., 2017; GUIDOLINI et al., 2018).	A vegetação nativa, especialmente vegetação de entorno ou áreas de preservação permanente, é fundamental para a manutenção da qualidade e disponibilidade hídrica (GUIDOLINI et al., 2018)

Tabela A13 - Valor real dos indicadores de sustentabilidade (EDr) selecionados para os municípios da GD1 e GD8 (2010).

	GD1 - Alto Rio Grande			GD8 - Baixo Rio Grande		
	Lavras	Liberdade	Nazareno	Conceição das Alagoas	Iturama	Uberaba
Dimensão Social						
SOC1	61,84	32,00	43,09	44,2	52,13	62,95
SOC2	77,80	75,01	74,82	76,72	75,88	75,71
SOC3	11,40	15,30	15,6	12,8	14,00	14,00
SOC4	93,51	71,61	85,83	92,77	96,77	93,99
SOC5	92,35	80,11	76,75	85,98	90,33	94,17
SOC6	3,16	21,01	1,73	39,89	10,48	25,69
SOC7	92,44	71,45	87,74	92,15	95,29	96,38
Dimensão Econômica						
EC1	0,50	0,59	0,47	0,51	0,46	0,50
EC2	889,65	546,79	491,13	770,72	753,23	978,01
EC3	16209,02	8694,08	12816,6	21261,75	44396,9	24661,21
EC4	67,15	60,97	61,22	68,52	69,42	70,46
Dimensão Ambiental						
ENV1	8,15	7,28	6,70	7,225	5,60	4,33
ENV2	9325,00	9800,00	1225,00	75666,67	83950,00	19762,50
ENV3	6,53	5,98	6,15	6,25	6,40	5,91
ENV4	2,00	2,00	2,00	2,675	4,10	2,00
ENV5	0,10	0,17	0,09	0,567	0,42	0,07
ENV6	0,03	0,03	0,02	0,112	0,32	1,15
ENV7	5,92	31,69	12,38	10,971	6,61	17,03

Tabela A14 - Valor real dos indicadores de sustentabilidade (EDr) selecionados para os municípios da GD1 e GD8 (2015).

	GD1 - Alto Rio Grande			GD8 - Baixo Rio Grande		
	Lavras	Liberdade	Nazareno	Conceição das Alagoas	Iturama	Uberaba
Dimensão Social						
SOC1	67,66	36,81	48,90	48,89	59,68	68,61
SOC2	80,51	77,36	77,41	78,66	78,01	78,07
SOC3	6,28	11,00	10,02	9,58	10,23	9,82
SOC4	93,69	76,33	83,91	97,72	97,6	94,46
SOC5	93,99	76,83	79,44	88,16	93,41	94,59
SOC6	2,50	16,62	0,90	14,21	6,41	18,78
SOC7	94,81	75,04	95,13	97,28	96,77	96,01
Dimensão Econômica						
EC1	0,52	0,55	0,45	0,50	0,39	0,45
EC2	1018,51	607,49	566,73	865,89	861,88	1106,86
EC3	20973,67	13093,88	25878,12	23967,34	48415,87	38881,1
EC4	69,34	63,70	61,20	70,83	70,84	70,85
Dimensão Ambiental						
ENV1	8,25	7,33	6,63	7,78	5,60	4,73
ENV2	24195,93	7664,68	4016,00	75435,00	73378,66	12410,64
ENV3	6,93	6,60	6,88	7,03	7,06	6,58
ENV4	2,00	2,28	2,00	2,03	5,44	2,00
ENV5	0,56	0,77	0,37	0,98	0,91	0,18
ENV6	0,05	0,05	0,04	0,13	0,46	0,31
ENV7	5,91	33,58	13,31	10,36	7,92	17,53

Tabela A15 - Escala de desempenho dos indicadores associados à escala do BS.

Indicadores de Desenvolvimento Sustentável	Escala do Barômetro de Sustentabilidade				
	0 ≤ 20	20 ≤ 40	40 ≤ 60	60 ≤ 80	80 ≤ 100
	Insustentável	Quase Insustentável	Intermediário	Quase Sustentável	Sustentável
Escala de Desempenho do Indicador					
Ensino Fundamental completo (≥ 18 anos de idade) (%)	< 45	45-65	65-80	80-99	100
Esperança de vida ao nascer (anos)	< 45	45-55	55-65	65-70	>70
Mortalidade Infantil (%)	>25	25-15	15-10	10-8	≤ 7
Rede de abastecimento pública de água (% famílias)	< 65	65-75	75-90	90-99	100
Coleta de esgoto (% famílias)	< 65	65-75	75-90	90-99	100
Água sem tratamento (% famílias)	>25	25-15	15-5	5-1	0
Coleta de lixo (% famílias)	< 65	65-75	75-90	90-99	100
Índice de GINI (adimensional)	>0,50	0,50-0,30	0,30-0,20	0,20-0,10	0
Renda per capita (R\$) (2010)	<300,00	300,00-399,99	400,00-449,99	450,00-509,99	≥510,00
Renda per capita (R\$) (2015)	<500,00	500,00-569,99	570,00-679,99	680,00-787,99	≥788,00
Produto Interno Bruto (R\$) (2010)	<7.000,00	7.000,00-11.000,00	11.000,00-50.000,00	50.000,00-159.999,99	≥160.000,00
Produto Interno Bruto (R\$) (2015)	<7.000,00	7.000,00-11.000,00	11.000,00-50.000,00	50.000-128.999,99	≥129.000,00
Taxa de atividade (≥18 anos de idade)-%	<45	45-50	50-59	60-70	>70
Oxigênio D dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	<5	—	—	—	≥5
Coliformes totais (NMP/100mL)	>5000	—	—	—	≤5000
Potencial hidrogeniônico	< 6	—	—	—	6-9
Demanda bioquímica de oxigênio (mg.L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	>5	—	—	—	≤ 5
Nitrato (mg.L <sup>-1</sup> )	—	—	—	—	≤10
Fósforo Total (mg.L <sup>-1</sup> )	—	—	—	—	≤0,05
Vegetação nativa preservada (%)	<10	10-19	20-39	40-49	≥50