UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

FERNANDA IMADA DE LIMA

Estudo geoambiental de bacias hidrográficas utilizando o
modelo PER no município de São Carlos (SP)

SÃO CARLOS

2016

Versão corrigida.
Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa.

FERNANDA IMADA DE LIMA

Estudo geoambiental de bacias hidrográficas utilizando o
modelo PER no município de São Carlos (SP)

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em Ciências.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho

SÃO CARLOS-SP

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

L732e Lima, Fernanda Imada de
 Estudo geoambiental de bacias hidrográficas
 utilizando o modelo PER no município de São Carlos (SP)
 / Fernanda Imada de Lima; orientador Oswaldo Augusto
 Filho. São Carlos, 2016.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
 2016.

 1. Indicadores ambientais. 2. Modelo PER. 3. Bacias
 hidrográficas. 4. Erosão. 5. Sistema de Informação
 Geográfica (SIG). 6. Análise de agrupamentos. 7. Matriz
 de vulnerabilidade. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **FERNANDA IMADA DE LIMA.**

Título da dissertação: "Estudo geoambiental de bacias hidrográficas utilizando o modelo PER no município de São Carlos (SP)".

Data da defesa: 07/10/2016.

Comissão Julgadora:

Prof. Associado **Oswaldo Augusto Filho**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Frederico Yuri Hanai**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Dr. **Valdir Schalch**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Resultado:

Aprovada

APROVADA

APROVADA

Dedico este trabalho às pessoas que mais amo e sempre torceram pela minha felicidade: meus pais Valter e Harue, minha irmã Marina, minha avó Maria (*in memorian*), minha madrinha Sumyo (*in memorian*), meu padrinho Nilton (*in memorian*) e minha avó Yassue (*in memorian*).

AGRADECIMENTOS

A Deus que sempre olha por mim e provê as experiências necessárias para minha evolução.

Ao Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho por compartilhar seus conhecimentos durante os dois anos de mestrado e pela orientação em cada etapa deste trabalho. Muito obrigada pelo interesse, paciência, dedicação e disponibilidade para esclarecer minhas dúvidas.

Aos docentes do Departamento de Geotecnia pelos ensinamentos e ótimas aulas.

A todos os funcionários do Departamento de Geotecnia pela gentileza e excelente atendimento.

Ao Prof. Dr. Valdir Schalch por conceder a oportunidade de realizar o estágio em docência que me proporcionou uma valiosa experiência profissional.

Aos Profs. Drs. Tadeu Fabricio Malheiros, Luiz Eduardo Moschini e Frederico Yuri Hanai pelas contribuições no desenvolvimento desta dissertação.

À Profa. Dra. Marcilene Dantas cujos ensinamentos e orientação durante a graduação me motivaram a cursar o mestrado em Geotecnia.

À Liz Abreu Denúbila por ceder os dados utilizados neste estudo.

Aos funcionários da Prefeitura Municipal de São Carlos, IBGE, SAAE e CETESB que me atenderam prontamente e forneceram dados para esta pesquisa.

A todos os professores de quem tive a honra de ser aluna e sem os quais não teria chegado até aqui.

A toda minha família, especialmente minha mãe Harue, meu pai Valter e minha irmã Marina pelo amor incondicional, paciência e apoio em todas as fases da minha vida. Ao meu anjinho de pêlo, Frederico, por sempre estar ao meu lado, me receber com festinha, lambeijos e amor e me animar nos momentos de desânimo.

Aos amigos Camila, Fabiana, Cayla, Greg, Ítalo, Michelle, Marcus, Valquíria, Luana, Beatriz Beltrami e Bruna por tornarem minha vida mais feliz e sempre estarem ao meu lado, nos momentos bons e ruins, dando conselhos e compartilhando momentos que fazem a vida valer a pena.

Aos amigos do mestrado e cuja amizade espero preservar, por me ajudarem nas disciplinas e participarem deste período da minha vida: Aline, Milena, Paula, Ayla e Roberto.

A todos os colegas de departamento e as pessoas que passaram pela minha vida ao longo do mestrado pela convivência, auxílio, alegrias e experiências que enriqueceram minha vivência.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

Por fim, sou imensamente grata a cada cidadão brasileiro que por meio de impostos possibilitaram meus estudos em escolas e faculdades públicas. Espero retribuir-lhes exercendo

minha profissão para o bem estar da sociedade e do meio ambiente.

“Não tenha medo de viver, de correr atrás dos seus sonhos. Tenha medo de ficar parado.”

Anita Garibaldi

RESUMO

LIMA, F. I. **Estudo geoambiental de bacias hidrográficas utilizando o modelo PER no município de São Carlos (SP)**. 2016. 145 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

Indicadores são ferramentas capazes de simplificar informações sobre fenômenos complexos e melhorar, com isso, o processo de comunicação. Também permitem o resumo de grande quantidade de informações relacionadas a um aspecto, auxiliando no diagnóstico e prognóstico ambiental. Alguns cuidados devem ser tomados na seleção e construção dos indicadores para que as medidas utilizadas sejam adequadas, pois influenciam a tomada de decisão. Indicadores inconsistentes fornecem informações imprecisas e enganosas sobre o que está sendo medido. Um dos propósitos desta ferramenta é auxiliar na implementação de mecanismos de proteção, recuperação e uso racional de recursos hídricos. As bacias hidrográficas têm sido usadas como uma das principais unidades de planejamento e gestão integrada por permitirem a visualização da dinâmica dos vários elementos dos meios físico e agentes naturais atrelados à ação humana. Além disso, são áreas expostas a impactos ambientais provenientes da urbanização, exploração intensa de recursos, uso e ocupação inadequados e emissão de efluentes nos cursos d'água. Por esses motivos, o presente estudo visou abordar o uso de indicadores ambientais para o diagnóstico do potencial de degradação por erosão nas bacias hidrográficas do município de São Carlos– SP como suporte à gestão dos recursos hídricos municipais, possibilitando o melhor aproveitamento destas áreas com menor impacto ambiental possível. O modelo Pressão-Estado-Resposta (PER) foi escolhido para orientar a coleta, organizar as informações e ajudar na interpretação e comunicação dos resultados por ser um dos mais utilizado para divulgar estatísticas e indicadores ambientais. A análise de Agrupamentos e a Matriz de Vulnerabilidade foram os métodos empregados para integrar os indicadores e disponibilizar as informações às partes interessadas como suporte à tomada de decisão. Utilizou-se o Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGIS® como ferramenta computacional básica para ponderar e agregar os indicadores por meio dos métodos escolhidos e, posteriormente, gerar os mapas analíticos. A partir da análise de agrupamentos as bacias foram divididas em cinco grupos de acordo com a semelhança entre elas, evidenciando a diversidade de cenários relacionados à erosão no município de São Carlos. Já a matriz de vulnerabilidade categorizou as bacias em cinco classes de potencial de degradação por erosão que apontou o menor potencial nas bacias das Gabirobas e Mogi-Guaçu e o maior na bacia do Monjolinho. A diferença entre estes métodos consiste no modo de sintetizar a informação, porém, ambos convergem para auxiliar na elaboração de estratégias de gestão.

Palavras-chave: Indicadores ambientais. Modelo PER. Bacias hidrográficas. Erosão. Sistema de Informação Geográfica (SIG). Análise de agrupamentos. Matriz de vulnerabilidade.

ABSTRACT

LIMA, F. I. Geoenvironmental study of watershed using the PSR model in São Carlos (SP). 2016. 145 f. Dissertation (Master in Geotechnical Engineering) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2016.

Indicators are tools that simplify information about complex phenomena and improve, therefore, the process of communication. They also allow to summary a lot of information related to one aspect, assisting in the environmental diagnosis and prognosis. Care should be taken in the selection and construction of indicators, as they influence the decision-making and therefore it is important that the measures used are appropriate. Inconsistent indicators provide inaccurate and misleading information about what is measured. A purpose of this tool is to assist in the implementation of water resources protection mechanisms, recovery and rational use. Watersheds are been used as major planning and integrated management units for allowing the visualization of the dynamics of the various physical elements and natural agents wattled to human action. In addition, these areas are exposed to environmental impacts from urbanization and intensive resource exploitation, inadequate use and occupation and effluents emissions into waterways. For these reasons, this study aimed to address the use of environmental indicators to diagnosis the erosion's degradation potencial in São Carlos's (SP) river basins to support the local water resources management, enabling better use of these areas with less possible environmental impact. The Pressure – State – Response (PSR) model was chosen to guide the information collection and organization and help in the interpretation and communication of the results because it is one of the most used methodology to disseminate statistics and environmental indicators. The Cluster Analysis and Vulnerability Matrix were the methods employed to integrate the indicators and provide information for stakeholders to support decision making. The Geographic Information System (GIS) ArcGIS® was used as computational tool to weight and aggregate indicators through the chosen methods and subsequently generate analytical maps. From the cluster analysis the basins were divided into five groups according to the similarity between them, showing the diversity of scenarios related to erosion in São Carlos. The vulnerability matrix categorized the basins in five erosion degradation potencial classes that pointed out the basins of Gabirobas and Mogi-Guaçu as less potential and Monjolinho as higher. The difference between these two methods is the way to synthesize information, but both converge to assist in decision making and management strategies development.

Keywords: Environmental indicators. PSR model. Watersheds. Erosion. Geographic Information System (GIS). Cluster analysis. Vulnerability matrix.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Fonte: MMA, 2016.....	30
Figura 2 - Pirâmide da informação. Fonte: Hammond et al. (1995)	36
Figura 3 - Dez passos para a construção de indicadores.	55
Figura 4 - Modelo de ficha técnica para a construção de indicadores.....	57
Figura 5 - Modelo Pressão - Estado – Resposta (PER)	60
Figura 6 - Formatos de dendogramas. Fonte: Landim (2000).....	74
Figura 7 - Matriz de risco.....	77
Figura 8 - Arquitetura dos sistemas de informação geográfica.....	79
Figura 9 - Bacias hidrográficas de São Carlos – SP.....	83
Figura 10 - Principais etapas e atividades da pesquisa.....	91
Figura 11 - Matriz Pressão x Estado	97
Figura 12 - Escala de cores utilizadas para ressaltar as classes de potencial de degradação por erosão	97
Figura 13 - Mapa de elevação dos terrenos das bacias hidrográficas analisadas	101
Figura 14 - Mapa de declividade das bacias de São Carlos	105
Figura 15 - Tipos de solo predominantes nas bacias do município de São Carlos	106
Figura 16 - Mapa de uso e ocupação das bacias de São Carlos. Fonte: Denúbila (2013).....	108
Figura 17 - Mapa de suscetibilidade à erosão do município de São Carlos.....	110
Figura 18 - Reservas ambientais no município de São Carlos	112
Figura 19 - Ficha técnica do indicador de pressão uso e ocupação.....	113
Figura 20 - Mapa do indicador de pressão: uso e ocupação do solo	115
Figura 21 - Ficha técnica do indicador de estado suscetibilidade à erosão	116
Figura 22 - Mapa do indicador de estado: suscetibilidade à erosão	118
Figura 23 - Ficha técnica do indicador de resposta: reservas ambientais.....	119
Figura 24 - Mapa do indicador de resposta: reservas ambientais.....	121
Figura 25 - Modelo PER voltado ao diagnóstico da vulnerabilidade à erosão das bacias de São Carlos	Erro! Indicador não definido.
Figura 26 - Mapa de agrupamento das bacias de São Carlos.....	124
Figura 27 - Matriz Indicador de Pressão vs Indicador de Estado.....	126
Figura 28 - Mapa Pressão vs. Estado	127
Figura 29 - Matriz final: Índice pressão e estado vs. Indicador de resposta.....	128
Figura 30 - Mapa Pressão x Estado x Resposta.....	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Área das bacias hidrográficas analisadas	100
Tabela 2 - Percentuais de área das bacias distruibuidos nas diferentes classes de elevação do terreno	102
Tabela 3 - Distribuição do percentual de área das bacias nas diferentes classes de declividade do terreno	103
Tabela 4 - Distribuição percentual em área das bacias dos tipos de solo (textura) do município de São Carlos.....	103
Tabela 5– Distribuição dos percentuaisde área das bacias nas classes de suscetibilidade à erosão pluvial.....	109
Tabela 6 - Indicador de pressão (uso e ocupação) obtido para as 10 bacias analisadas	114
Tabela 7 - Indicador de estado (suscetibilidade à erosão pluvial) obtido para as 10 bacias analisadas	117
Tabela 8 - Indicador de resposta (Reservas Ambientais) obtido para as 10 bacias analisadas .	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e limitações do uso de indicadores. Fonte: Direcção Geral do Ambiente (2000)	39
Quadro 2 - Síntese de estudos utilizando o modelo PER	63
Quadro 3 - Síntese de estudos utilizando o modelo PER (continua).....	64
Quadro 4 - Síntese de metodologias de ponderação e análise de indicadores ambientais	67
Quadro 5 - Síntese de metodologias de ponderação e análise de indicadores ambientais (continua)	68
Quadro 6 - Indicadores de pressão, estado e resposta seleccionados	92
Quadro 7 - Características dos grupos de bacias obtidos pela análise de agrupamentos	123
Quadro 8 - Classificação das bacias quanto ao potencial de degradação à erosão.....	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP: Processo Analítico Hirárquico/ *Analytic Hierarchy Process*

ANA: Agência Nacional de Águas

APA: Agência Portuguesa do Ambiente

APA: Agência de Proteção Ambiental

APREM: Área de Proteção e Recuperação dos Mananciais

CBHs: Comitês de Bacia Hidrográfica

CDS: Comissão para o Desenvolvimento Sustentável

CEM: Centro de Estudos da Metrópole

CEPAL: Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe

CERHs: Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e Distrito Federal

CETESB: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

DDT: Dicloro – Difenil – Tricloroetano

DGA: Direcção Geral do Ambiente

DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral

EEA: Agência Ambiental Européia/ *European Environment Agency*

EEJ: Estação Ecológica do Jataí

EELA: Estação Experimental de Luiz Antônio

EESCAR: Estação Ecológica de São Carlos

FER: Força Motriz – Estado – Resposta

FPEIR: Força Motriz – Pressão – Estado – Impacto – Resposta

GNSS: Sistema de Satélite de Navegação Global/ *Global Navigation Satellite System*

GPS: Sistema de Posicionamento Global/ *Global Positioning System*

GTZ: Agência de Cooperação Técnica Alemã/ *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit*

IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBES: Índice de bem-estar econômico sustentável

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH: Índice de Desenvolvimento Humano

IPT: Instituto de Pesquisa Tecnológica

IPTU: Imposto Predial e Territorial Urbano

MDEHC: Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente

MDT: Modelo Digital do Terreno

MMA: Ministério do Meio Ambiente

OECD: Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico/ *Organisation for Economic Cooperation and Development*

OGRH: Órgãos Gestores de Recursos Hídricos Estaduais e do Distrito Federal

PEIR: Pressão – Estado – Impacto – Resposta

PER: Pressão – Estado – Resposta

PIB: Produto Interno Bruto

PMSP: Prefeitura Municipal de São Paulo

PMSSanca: Plano Municipal de Saneamento do Município de São Carlos

PNUMA: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

RL: Reserva Legal

SAAE: Serviço Autônomo de Água e Esgoto

SADE: Sistema de Apoio à Decisão Espacial

SESI: Serviço Social da Indústria

SIG: Sistema de Informação Geográfica

SIMBIO: Sistema de Monitoramento da Biodiversidade

SINGREH: Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SP: São Paulo

SPSS: Pacote Estatístico para Ciência Social/ *Statistical Package for Social Science*

SRHU: Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano

SVMA: Secretaria Municipal do Verde e Meio Ambiente

TAM: Táxi Aéreo Marília

UC: Unidade de Conservação

UFSCar: Universidade Federal de São Carlos

UGRHIs: Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos

UNEP: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente/ *United Nations Environment Programme*

UNICEP: Centro Universitário Central Paulista

USP: Universidade de São Paulo

UTM: Universo Transverso de Mercator

SUMÁRIO

<u>1. INTRODUÇÃO</u>	<u>24</u>
1.1 OBJETIVOS	27
<u>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>28</u>
2.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL	28
2.2 INDICADORES AMBIENTAIS: CONCEITOS E FUNÇÕES	33
2.3 TIPOS DE INDICADORES AMBIENTAIS	42
2.3.1 GEOINDICADORES	45
2.3.1.1 Suscetibilidade à erosão	47
2.4 CONSTRUÇÃO E SELEÇÃO DE INDICADORES	51
2.5 O MODELO PRESSÃO-ESTADO-RESPOSTA (PER)	58
2.6 PONDERAÇÃO E ANÁLISE DOS INDICADORES AMBIENTAIS	64
2.6.1 ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS	68
2.6.2 MATRIZ DE VULNERABILIDADE	76
2.7 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)	78
<u>3. ÁREA DE ESTUDO</u>	<u>82</u>
3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS	85
<u>4. MÉTODO E ETAPAS DA PESQUISA</u>	<u>90</u>
4.1 PLANEJAMENTO	91
4.2 LEVANTAMENTO DE DADOS	92
4.3 APLICAÇÃO DO MODELO PRESSÃO-ESTADO-RESPOSTA (PER)	93
4.3.1 ESTRUTURAÇÃO DOS INDICADORES	93
4.3.2 INTEGRAÇÃO DOS INDICADORES	95
4.3.2.1 Análise de agrupamentos	95
4.3.2.2 Matriz de vulnerabilidade	96
4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO	98
<u>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	<u>99</u>
5.1 BASE DE DADOS ESPACIAL	99
5.2 INDICADORES DE PRESSÃO, ESTADO E RESPOSTA	113
5.3 DIAGNÓSTICO GEOAMBIENTAL DAS BACIAS COM BASE NO MODELO PER	122
<u>6. CONCLUSÃO</u>	<u>134</u>
<u>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u>	<u>135</u>

1. INTRODUÇÃO

O movimento ambientalista ganhou força na década de 1960 com a publicação do livro de Rachel Louise Carson intitulado *Primavera Silenciosa*, sobre os impactos do uso do pesticida DDT (dicloro-difenil-tricloroetano) na cadeia alimentar, e a fundação do Clube de Roma em 1968, grupo de estudos e debate sobre desenvolvimento e questões ambientais. A partir daí surgiram diversos movimentos para a reforma da sociedade industrial e, no ano de 1987, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento lançou o termo desenvolvimento sustentável no relatório “Nosso Futuro Comum”, também chamado de “Relatório Brundtland” (SOUZA et al., 2009).

Esta maior reflexão acerca do progresso e das pressões da antroposfera sobre a ecosfera despertou a consciência acerca dos problemas ambientais gerados por padrões de vida incompatíveis com a regeneração dos recursos da natureza. Neste cenário, os indicadores começam a ser utilizados na tentativa de ajustar a postura da sociedade em relação ao meio ambiente (BELLEN, 2002).

A definição do termo “indicador”, do ponto de vista científico, varia pouco de um autor para outro. Em geral, os pesquisadores consideram que são parâmetros quantitativos ou qualitativos utilizados para detalhar se os objetivos de uma proposta estão sendo bem conduzidos (avaliação de processo) ou foram alcançados (avaliação de resultados) (MINAYO, 2009).

O modelo Pressão-Estado-Resposta é um dos mais utilizados para apresentação de estatísticas ambientais por ter uma aplicação simples e fácil que evidencia os elos causais entre o meio físico-natural e o meio social, subsidiando a tomada de decisão. Além disso, o mecanismo de retro-alimentação proporcionado pelos indicadores de resposta é um importante aliado no processo de gestão (SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA, 2006).

Os indicadores ambientais podem abranger os três compartimentos existentes na natureza e definidos, de acordo com a Resolução Conama nº 001 de 23 de janeiro de 1986 (BRASIL, 1986), como:

- Meio físico: o subsolo, águas, ar e o clima, destacando os recursos minerais, a topografia, os tipos e aptidões do solo, os corpos d'água, o regime hidrológico, as correntes marinhas e atmosféricas;

- Meio biótico: a fauna, flora, as espécies indicadoras da qualidade ambiental, raras e ameaçadas de extinção e as áreas de preservação permanente;
- Meio socioeconômico: o uso e ocupação do solo, os usos da água e a socioeconomia, destacando os sítios e monumentos históricos, arqueológicos e culturais da comunidade, as relações de dependência entre a sociedade local, os recursos ambientais e a potencial utilização futura desses recursos.

Em questões multidisciplinares como a gestão ambiental, os indicadores possibilitam resumir grande quantidade de informação para auxiliar na tomada de decisão, diagnóstico e prognóstico ambiental. Além disso, a existência de diversos tipos de indicadores permite selecioná-los de acordo com a problemática abordada. Os geoindicadores, por exemplo, revelam a natureza geológica de determinada área por meio de diversos fenômenos físicos (HIRAI; AUGUSTO FILHO, 2008).

A erosão é um geoindicador capaz de revelar diversos danos ambientais, sociais e econômicos, mas que, não obstante, é muitas vezes negligenciado pelos administradores públicos. De acordo com Fantinatti, Ferrão e Zuffo (2015), a urbanização desordenada, planejamento inexistente ou inadequado e a omissão do poder público, acarretam inúmeros problemas que desencadeiam a erosão, tais como: perda de mata ciliar, desmatamento, mudança de infiltração da água e aumento do escoamento superficial.

O potencial natural de erosão é influenciado por fatores pluviométricos (erosividade das chuvas), pedológicos (erodibilidade dos solos) e topográficos (comprimento de rampa e declive). Além disso, a ação humana, caracterizada pelo uso e manejo do solo, também afeta o potencial erosivo de uma área (VALLE JUNIOR, 2008).

Quando aplicados às bacias hidrográficas, os indicadores ajudam proteger, recuperar e auxiliar no uso racional dos recursos hídricos. Também simplificam a quantificação, análise e comunicação do conhecimento para tornar fenômenos complexos acessíveis a toda população, mesmo quando não há conhecimento prévio da problemática abordada (PAULA JUNIOR; POMPERMAYER, 2007).

Os indicadores podem orientar a elaboração de ações ambientais direcionadas aos recursos hídricos, pois, ao espelhar a qualidade do meio ambiente e de vida da população, fornecem um *feedback* que permite internalizar noções de desenvolvimento sustentável nas políticas públicas e monitorar o estado das bacias hidrográficas ao longo do tempo (GUIMARÃES, 2008).

As bacias hidrográficas são unidades territoriais na gestão dos recursos hídricos

formadas por elementos físicos, biológicos, sociais e políticos que interagem entre si. Proporcionam maior envolvimento da população e integração interestadual para a tomada de decisão e formação de instituições destinadas à conservação da qualidade e quantidade da água. O fato dos limites das bacias muitas vezes não coincidirem com as unidades federativas, implica na formulação de planos e projetos que busquem evitar conflitos entre governos e não beneficiem os estados mais fortes política ou economicamente (CASTRO, 2005).

Antes de construir um conjunto de indicadores é necessário definir claramente os objetivos pretendidos e os elementos a serem monitorados para que se possa determinar as mudanças e transformações desejadas ao final do estudo. Posteriormente, com os dados necessários à pesquisa coletados e organizados, é possível realizar análises pertinentes a situação atual e tomar decisões focadas nas reais necessidades e oportunidades existentes (SERVIÇO SOCIAL DA INDÚSTRIA, 2010).

A análise dos indicadores é importante por permitir mensurar e acompanhar os progressos em direção aos objetivos desejados, pois, aquilo que não é medido não pode ser gerenciado. Esta etapa deve ser realizada, sempre que possível, considerando valores de referência e parâmetros para poder subsidiar ações de melhoria (NÚCLEO DE APOIO A GESTÃO HOSPITALAR, 2014).

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) subsidiam a análise dos indicadores e a tomada de decisão ao monitorar os problemas ambientais por meio da manipulação de grande quantidade de informação e representação cartográfica dos dados. Estes sistemas são comumente empregados no manejo e gestão de bacias hidrográficas por possibilitar o cálculo de dimensões, área de abrangência e uso e ocupação. A capacidade dos SIGs de armazenar, manipular e visualizar informações possibilita um gerenciamento mais eficiente do local (ZANATA et al., 2012).

O presente estudo teve por objetivo utilizar um sistema de indicadores, selecionados e sistematizados no modelo Pressão-Estado-Resposta (PER), para realizar o diagnóstico do potencial de degradação por erosão das bacias hidrográficas do município de São Carlos.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa buscou-se responder a seguinte pergunta problema: o modelo de indicadores PER é uma boa ferramenta para a gestão e diagnóstico geambiental de bacias hidrográficas?

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGIS® foi a ferramenta computacional usada para ponderar os indicadores, produzir mapas temáticos e,

posteriormente, analisá-los mediante os métodos escolhidos e gerar os mapas analíticos. De acordo com Nunes (2015), um SIG possui grande quantidade de instrumentos e ambiente simples de desenvolvimento e customização.

As bacias do município de São Carlos foram selecionadas como área de estudo considerando a importância da adoção das bacias hidrográficas como unidade de análise, disponibilidade de dados secundários e os impactos ambientais aos quais muitas vezes são expostas, provenientes da urbanização, exploração intensa de recursos, uso e ocupação inadequados e emissão de efluentes nos cursos d'água.

Como ensaio metodológico, dois métodos foram utilizados para analisar os indicadores e produzir resultados que permitissem estabelecer comparações entre as bacias estudadas. O primeiro consistiu na análise de agrupamentos que, de acordo com Quintal (2006), é um procedimento da Estatística Multivariada utilizado para compreender tendências em uma população de dados por meio da criação de grupos com elementos semelhantes entre si e diferentes dos componentes de outros grupos. O segundo, denominado matriz de vulnerabilidade, buscou classificar o potencial erosivo das bacias.

A relevância deste estudo consiste na proposta de um modelo de previsão de perdas de solos por erosão composto por indicadores, SIG e dois métodos de análise que auxilie na alocação de recursos e esforços no processo de planejamento ambiental de bacias hidrográficas.

1.1 Objetivos

O objetivo principal da pesquisa foi efetuar um ensaio metodológico utilizando indicadores ambientais dos meios físico, biótico e socioeconômico, estruturados no modelo Pressão-Estado-Resposta (PER), para realizar o diagnóstico do potencial de degradação por erosão nas bacias hidrográficas de São Carlos e, deste modo, subsidiar a gestão de recursos hídricos.

Também foram definidas os seguintes objetivos específicos para alcançar o objetivo principal proposto:

- Empregar dois métodos distintos para agregar e analisar os indicadores sistematizados no modelo PER: matriz de vulnerabilidade e análise de agrupamentos;

- Realizar ensaio metodológico no município de São Carlos;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Gestão de recursos hídricos no Brasil

De acordo com Setti et al. (2000), a gestão de recursos hídricos é a forma pela qual se pretende analisar e resolver as questões relacionadas à escassez e uso adequado da água visando o benefício da sociedade. A motivação política é fundamental para a implantação efetiva da gestão dos recursos hídricos, pois permite ter meios de instituir as providências recomendadas para controlar e planejar o aproveitamento dos recursos. Qualquer processo de gerenciamento de recursos hídricos deve ser norteado pelos seguintes princípios:

- O acesso aos recursos hídricos é um direito de todos;
- A água deve ser considerada um bem econômico;
- A bacia hidrográfica deve ser adotada como unidade de planejamento;
- A disponibilidade da água deve ser definida de acordo com critérios sociais, econômicos e ambientais;
- Um sistema de planejamento e controle deve ser estabelecido;
- Cooperação internacional para o intercâmbio científico e tecnológico;
- Constante desenvolvimento tecnológico e de recursos humanos;
- Cooperação internacional na gestão de cursos d'água que atravessam fronteiras entre países;
- Assegurar recursos financeiros para a avaliação sistemática dos recursos hídricos;
- Presença da educação ambiental em toda ação programada.

A primeira experiência brasileira na gestão dos recursos hídricos ocorreu em 1933 com a criação da Diretoria de Águas, depois Serviço de Águas, no Ministério da Agricultura. Posteriormente, no ano de 1934, este serviço foi transferido para o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), quando é editado o Código de Águas. Nesta época, a administração dos recursos hídricos no Brasil era denominada modelo burocrático e tinha como objetivo predominante fazer cumprir os dispositivos legais sobre águas por meio de extensa legislação relativa à concessões e autorizações de

uso, licenciamento de obras, ações de fiscalização, interdição e multa (BORSOI; TORRES, 1997).

Na década de 1970, a legislação destinada à regular o uso e o acesso aos recursos hídricos no país, embora abrangente, já não correspondia aos problemas ambientais gerados no contexto do desenvolvimento industrial. As fontes de conflito entre múltiplos usuários aumentaram com a construção de hidrelétricas, emissão de esgotos urbanos e industriais no leito dos rios, contaminação do lençol freático pela indústria e agricultura, aumento da demanda de água tratada nos centros urbanos, a expansão da agricultura irrigada, entre outros fatores desestabilizadores das relações sociais (CUNHA; COELHO, 2009).

Durante os anos 90, diante dos alertas sobre o risco de uma crise hídrica, em especial após a realização da Eco 92 no Rio de Janeiro, o governo brasileiro elaborou medidas para minorar os problemas existentes no país devido a persistência da cultura da abundância e infinidade da água. Em dezembro de 1996 o Congresso Nacional aprovou o Projeto de Lei Nacional de Recursos Hídricos, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh). No ano seguinte, em 8 de janeiro de 1997, o Presidente da República sancionou a Lei nº 9.433, conhecida como Lei das Águas, dotando o Brasil dos instrumentos legais e institucionais necessários ao ordenamento das questões referentes à disponibilidade e ao uso sustentável de suas águas (MACHADO, 2003).

De acordo com a Agência Nacional de Águas (2013), o arcabouço institucional, ou matriz institucional da Política Nacional de Recursos Hídricos, é constituído pelas seguintes entidades:

- Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH): órgão consultivo e deliberativo criado pela Lei nº 9.433 de 1997, e regulamentado com o Decreto nº 2.612 de 3 de junho de 1998, para atuar na formulação da Política Nacional de Recursos Hídricos.
- Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (SRHU): opera como secretaria executiva do CNRH e integra a estrutura do Ministério do Meio Ambiente.
- Agência Nacional de Águas (ANA): autarquia sob regime especial criada pela Lei nº 9.984 de 2000, tendo atribuições de outorgar e fiscalizar os usos da água, implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos e coordenar o Singreh.

- Conselhos de Recursos Hídricos dos estados e do Distrito Federal (CERHs): órgãos consultivos e deliberativos instituídos pelas unidades da federação com a função de formular a Política de Recursos Hídricos no âmbito da respectiva unidade federativa.
- Órgãos Gestores Estaduais e do Distrito Federal (OGRHs): órgãos com competência de outorgar e fiscalizar o uso dos recursos hídricos em rios de domínio dos estados e do Distrito Federal e implantar os Sistemas Estaduais e Distrital de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
- Comitês de Bacias Hidrográficas (CBHs): colegiados integrantes do Singreh onde são debatidas, no âmbito das bacias hidrográficas, as questões relacionadas à gestão dos recursos hídricos.
- Agências de Água: instâncias técnicas e executivas que atuam como secretaria-executiva do respectivo Comitê de Bacia.

O Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh) estabeleceu um arranjo institucional claro e baseado na gestão compartilhada do uso da água (GUIMARÃES, 2008). O organograma do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Fonte: MMA, 2016

O Ministério do Meio Ambiente (MMA) é a principal instituição que atua no gerenciamento e controle de recursos hídricos e meio ambiente, zelando pela conservação, recuperação e uso racional da água. Contempla os programas e ações dos órgãos da administração direta, dentre os quais se destacam a Secretaria de Recursos Hídricos e a Agência Nacional de Águas (ANA) (GUIMARÃES, 2008).

Um fundamento importante da Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997 é a adoção da bacia hidrográfica como “unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos” (artigo 1º, V) (BRASIL, 1997).

A bacia hidrográfica é definida pela área de drenagem de um rio principal e de seus tributários, contendo subsistemas e diferentes ecossistemas como várzea e terra firme, por exemplo. O fato dos limites territoriais das bacias nem sempre coincidirem com as delimitações político-administrativas, cria complicadores para a gestão ambiental, pois, uma mesma bacia pode ser compartilhada por diferentes países, estados ou municípios (CUNHA; COELHO, 2009).

Quando se interliga a outra de ordem hierárquica superior, a bacia hidrográfica é denominada sub-bacia, porém, estes conceitos são relativos e estão relacionados a hierarquias dentro de uma determinada malha hídrica. O termo “microbacia”, embora difundido em nível nacional, constitui uma denominação empírica, imprópria e subjetiva, por isso sugere-se a sua substituição pelo termo sub-bacia hidrográfica (ARAÚJO et al., 2009).

Estas áreas representam uma unidade física de planejamento ideal para trabalhar a questão ambiental, pois rompem as barreiras políticas tradicionais de gerenciamento, como a divisão político-administrativa do município, permitindo, por exemplo, elaborar o balanço hídrico por meio da gestão da oferta e da demanda de consumo de água (PHILIPPI JUNIOR et al., 2004).

Nas regiões com profunda urbanização e industrialização, o uso intensivo dos recursos hídricos superficiais, associado ao lançamento de efluentes nos cursos d'água, tem gerado escassez crescente e perda da qualidade das águas, evidenciando cada vez mais a ineficácia de ações pontuais e isoladas e a necessidade de gerenciamento dos problemas em nível regional, ou seja, no âmbito da bacia hidrográfica (BITAR; ORTEGA, 1998).

A adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento é de aceitação universal, pois constitui um sistema natural bem delimitado no espaço, composto por

terras topograficamente drenadas por um curso d'água e seus afluentes onde os recursos naturais são integrados e mais facilmente interpretados. Toda porção de terra está inserida em uma bacia e, por esse motivo, é um limite nítido para a ordenação territorial e manejo da água (SANTOS, 2004).

A bacia hidrográfica, considerada uma unidade natural, também permite por meio da diferenciação de paisagens entrelaçar a ação humana com os fatores físicos, químicos e os agentes naturais existentes na sua dinâmica, fornecendo um diagnóstico concreto sobre o real estado da área (FREITAS; MARTINS, 2014).

O modelo de gestão das bacias hidrográficas, adotado na legislação brasileira, baseia-se nos pressupostos do co-manejo e da descentralização da tomada de decisão. Com isso, os comitês de bacia e as agências de água representam rearranjos institucionais com o objetivo de conciliar interesses diversos e, não raro, antagônicos, assim como controlar conflitos e dividir responsabilidades (CUNHA; COELHO, 2009).

Nesse contexto, de acordo com o art.20 da Lei Estadual nº7663 de 30/12/1991, as Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs) são “*unidades hidrográficas, com dimensões e características que permitam e justifiquem o gerenciamento descentralizado dos recursos hídricos*” (BRASIL, 1991).

As UGRHIs, em geral, são formadas por partes de bacias hidrográficas ou por um conjunto delas. Os estudos devem ter a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e focalizar a UGRHI, o que pode requerer contemplar mais de uma Unidade de Gerenciamento como, por exemplo, nos casos de UGRHIs sucessivas dentro de uma mesma bacia, transferências de águas entre UGRHIs ou de bacias compartilhadas com estados vizinhos (SÃO PAULO, 2006).

Delimitar as bacias é muito importante para a gestão dos recursos naturais, pois, permite que o poder público e a sociedade civil adquiram maior capacidade de organizar e direcionar esforços, reconhecer os níveis de demandas específicas, formularem políticas e apoiar a operacionalização dos comitês de bacias hidrográficas (ALBUQUERQUE, 2012).

Bitar e Ortega (1998), afirmam que tem sido comum a formação de agências, comitês, comissões e consórcios com o intuito de promover o gerenciamento ambiental de uma bacia hidrográfica e garantir o suprimento e a qualidade da água. Neste contexto, a gestão das bacias hidrográficas envolve as seguintes atividades:

- Identificar os diferentes usos dos recursos hídricos;

- Reconhecer as atividades que contribuem para a degradação da qualidade das águas;
- Identificar e avaliar as degradações instaladas;
- Formular e implementar programas especiais de controle e recuperação dos corpos d'água degradados;
- Avaliar e atualizar periodicamente os programas executados.

No Brasil, as pesquisas científicas no campo das Ciências Ambientais têm adotado cada vez mais estas áreas como célula natural de análise, estimuladas pelo aumento de estudos relacionados ao planejamento ambiental a partir da década de 1990 e a criação de normas e regulamentos de ordenamento do território como, por exemplo, os Planos Diretores municipais. Seja no âmbito federal, estadual ou municipal, o desenvolvimento de estudos e o surgimento de leis para regulamentar o uso dos recursos naturais destacaram a importância da bacia hidrográfica como unidade de planejamento ambiental (SACRAMENTO; REGO, 2006).

Quando há ausência de planejamento no uso e ocupação do solo e políticas ambientais inadequadas, as bacias são expostas à perturbações com reflexos negativos e, muitas vezes, irreversíveis para a saúde dos ecossistemas. Tais desequilíbrios apresentam implicações sociais, econômicas e ambientais relevantes que requerem a realização de estudos como instrumento de análise ecológica e referencial científico para viabilizar projetos de planejamento socioambiental (SACRAMENTO; REGO, 2006).

2.2 Indicadores ambientais: conceitos e funções

O termo indicador remonta ao verbo do latim *indicare* que significa revelar ou apontar, anunciar ou tornar de conhecimento público, estimar ou colocar um preço. Indicadores transmitem informações sobre o progresso em direção a um objetivo, fornecem pistas para uma questão de grande importância e tornam perceptível uma tendência ou fenômeno que não é facilmente detectado. Uma queda da pressão barométrica, por exemplo, pode sinalizar uma tempestade que se aproxima. Portanto, a significância do indicador estende-se além do que é medido para um fenômeno maior de interesse (HAMMOND et al., 1995).

Existem muitas definições para indicador. Segundo a *European Environment Agency* (2005) é uma medida, em geral quantitativa, que pode ser utilizada para ilustrar e

comunicar fenômenos complexos de forma simples, incluindo as tendências e progresso ao longo do tempo. Já a terminologia da *Organisation for Economic Co-operation and Development* (2001) aponta para duas funções principais dos indicadores:

- Reduzir o número de medições e parâmetros que normalmente seria necessário para representar uma situação de forma exata. Consequentemente, o tamanho e nível de detalhe de um conjunto de indicadores precisam ser limitados;
- Simplificar o processo de comunicação pelo qual os resultados são fornecidos ao utilizador. Devido a esta simplificação e adaptação às necessidades do usuário, os indicadores nem sempre atendem às demandas científicas rigorosas, por isso, devem ser considerados como uma expressão de "o melhor conhecimento disponível".

O Ministério do Meio Ambiente (MMA) define indicador como informações quantificadas de caráter científico e fácil compreensão, usadas nos processos de decisão em todos os níveis da sociedade. São úteis como ferramentas de avaliação de determinados fenômenos, apresentando tendências e progressos que se alteram ao longo do tempo. Permitem simplificar o número de informações para reduzir os investimentos em tempo e recursos financeiros (BRASIL, 2015).

Quantificar a informação é um aspecto importante dos indicadores, mas bons indicadores também podem ser qualitativos. Tradicionalmente opta-se por informação qualitativa quando a quantitativa não estiver disponível, possuir custo excessivo ou o atributo de interesse não for quantificável (RIBEIRO, 2002).

Indicadores permitem medir, no caso de elementos quantitativos, ou verificar, no caso de elementos qualitativos, se os objetivos ou as mudanças previstas estão sendo alcançados. Também possibilitam conhecer melhor os avanços em termos de resultados ou impactos, constituindo, portanto, uma ferramenta de mensuração utilizada para obter aspectos quantitativos e/ou qualitativos de um dado fenômeno, com vistas a avaliar e a subsidiar a tomada de decisão (ROZADOS, 2005).

Em síntese, dentre a diversidade de termos utilizados por muitos autores, há o consenso de que os indicadores são uma forma de simplificação e sintetização de fenômenos complexos (COELHO, 2008).

Na composição de um indicador é possível incluir mais de uma variável (ou parâmetro), ou seja, um único indicador, mesmo possuindo certa especificidade, como é

o caso dos indicadores ambientais, pode reunir parâmetros diversos (PASSOS; PIRES, 2008).

Existem distinções entre os termos indicador, índice e parâmetro que devem ser delimitadas para esclarecer dúvidas decorrentes da aplicação destas ferramentas. A OECD (2003) definiu:

- Indicador: como um parâmetro, ou valor derivado de parâmetros, que serve para fornecer informações e descrever o estado de um fenômeno/área, com uma significância que transpõe o valor diretamente associado a ele;
- Índice: como um conjunto de parâmetros ou indicadores ponderados;
- Parâmetro: como uma propriedade que é medida e observada.

Diferentes classes de indicadores podem ser obtidas em níveis hierárquicos distintos. Indicadores ou índices podem ser aglutinados, porém, nem sempre esse método é recomendado, significativo ou factível devido à possibilidade da agregação na forma de um índice restringir ou eliminar informações potencialmente importantes em um processo analítico (RIBEIRO, 2002).

Os indicadores são distintos das estatísticas ou dados primários, apesar de serem frequentemente apresentados na forma de estatísticas ou gráficos. De fato, os indicadores e índices altamente agregados ocupam o topo de uma pirâmide de informações, cuja base é composta por dados primários derivados de monitoramento e análise de dados, conforme mostra a Figura 2. Indicadores representam um modelo empírico da realidade, não a própria realidade, mas devem ser analiticamente sólidos e ter uma metodologia fixa de medição (HAMMOND et al., 1995).

Figura 2 - Pirâmide da informação. Fonte: Hammond et al. (1995)

De acordo com a Direcção Geral do Ambiente (2000), actual Agência Portuguesa do Ambiente (APA), os indicadores e índices podem atender um amplo conjunto de aplicações e objetivos, tais como:

- Atribuição de recursos: ajudando os decisores ou gestores na atribuição de fundos, alocação de recursos naturais e determinação de prioridades;
- Classificação de locais: comparação de condições em diferentes locais ou áreas geográficas;
- Cumprimento de normas legais: aplicação em áreas específicas para sintetizar a informação sobre o nível de cumprimento das normas ou critérios legais;
- Análise de tendências: utilização em séries de dados para detectar tendências no tempo e no espaço;
- Informação ao público: sobre os processos de desenvolvimento sustentável;
- Investigação científica: uso em desenvolvimentos científicos como forma de alerta para a necessidade de investigação mais aprofundada.

Os indicadores podem ser classificados de diversas formas, porém, a mais comum é a divisão de acordo com a área temática a que se referem: saúde, educacionais, trabalho e renda, demográficos, habitacionais, segurança pública e justiça, infraestrutura, desigualdade e ambientais. Outra maneira de classificá-los é como analítico ou sintético. Os indicadores analíticos analisam questões sociais e são muito utilizados pela gestão pública na fase de elaboração do diagnóstico da realidade local, como por exemplo, as taxas de evasão escolar, de mortalidade infantil ou de desemprego. Já os sintéticos

costumam sistematizar várias dimensões da realidade econômica e/ou social em uma mesma medida, tal como o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) (PROGRAMA CIDADES SUSTENTÁVEIS, 2014).

Há também os indicadores sistêmicos e de desempenho, denominados com relação à sua função. Os indicadores sistêmicos apoiam-se em referenciais técnicos, ou seja, existe conhecimento suficiente desenvolvido pela comunidade científica para embasar a adoção de parâmetros desejáveis em determinada situação do sistema (SILVA, 2008).

Os indicadores de desempenho são ferramentas para comparação, que incorporam indicadores descritivos e referências a um objetivo político específico. Fornecem aos tomadores de decisão informações sobre o nível de sucesso na realização de metas locais, regionais, nacionais ou internacionais. São utilizados em diversas escalas para ajudar na avaliação política e no processo decisório (BELLEN, 2002).

Quando aplicados ao meio ambiente, os indicadores podem ser ambientais ou de desenvolvimento sustentável. Indicadores ambientais servem para diagnosticar alterações no estado do ambiente decorrentes de atividades humanas, ao passo que indicadores de desenvolvimento sustentável apresentam como foco a integridade dos recursos naturais, diante do crescimento/desenvolvimento econômico aplicado em unidades territoriais locais, regionais ou nacionais (GUIMARÃES, 2008).

O indicador ambiental é um tipo de informação selecionada que condensa e descreve os aspectos complexos relativos à qualidade do meio ambiente, cujo significado extrapola sua natureza intrínseca. A avaliação do estado ou qualidade de um ecossistema é uma tarefa difícil, pois não são estáticos, impondo-se distinguir as variações decorrentes dos ciclos naturais daquelas provocadas pela ação humana. Um parâmetro ambiental deve, idealmente, possuir um valor limite de referência ou um objetivo a ser atingido para ser qualificado como um indicador ambiental. Este objetivo pode ser de natureza científica, política ou socioeconômica (MARANHÃO, 2007).

Diferentemente dos indicadores ambientais, os indicadores de desenvolvimento sustentável consideram as diversas dimensões que o conceito de sustentabilidade envolve (*triple bottom line*: econômica, social e ambiental), porém, o tema central é a interação entre os fatores da socioeconomia e do meio ambiente. Assim, a ênfase é avaliar os recursos naturais suscetíveis às mudanças decorrentes das atividades humanas e as atividades econômicas responsáveis por impactos sobre o meio ambiente (BIDONE; MORALES, 2004).

Embora pareçam limitados por não explicitar sua relação com dinâmicas socioeconômicas complexas, os indicadores puramente ambientais são necessários, pois, a partir deles surgiram indicadores ambientais com níveis de qualidade e precisão similares aos de indicadores econômicos e sociais. Contudo, com a progressiva incorporação do discurso de desenvolvimento sustentável, seu poder diminuiu e tornou-se necessário propor sistemas mais completos e complexos. Entretanto é importante continuar aperfeiçoando indicadores ambientais para auxiliar na construção de indicadores de desenvolvimento sustentável (MARTÍNEZ, 2001).

Os indicadores ambientais são importantes instrumentos de planejamento e gestão dos espaços urbanos e rurais. Atualmente o progresso econômico e social não pode ser dissociado da questão ambiental, por isso, dispondo de um conjunto de indicadores haverá parâmetros para um melhor aproveitamento dos recursos naturais e prevenção da degradação do meio ambiente e consequentes prejuízos econômicos. Além disso, a sociedade terá uma forma de avaliar seu progresso e evolução em direção à sustentabilidade (MATTAR NETO; KRÜGER; DZIEDZIC, 2009).

Entretanto, apesar de serem ferramentas úteis de gestão e comunicação, Santos (2004) afirma que alguns erros podem ser cometidos durante o levantamento e interpretação dos indicadores ambientais. É preciso tomar cuidado, priorizando o uso da informação e não sua simples obtenção. A maior falha no uso de indicadores é a dificuldade de avaliar a eficiência e eficácia dos resultados. Como medir, objetivamente, se uma informação é de boa qualidade, bem formulada e representativa da realidade? Como se mede a relação esperada entre o conjunto de indicadores utilizados e as alternativas propostas? Os resultados fazem jus à qualidade dos dados?

Além disso, ainda que os indicadores e índices simplifiquem a informação sobre fenômenos complexos de modo a melhorar a comunicação, proporcionando ganhos em clareza e operacionalidade, perde-se em detalhe da informação (KRAMA, 2009).

No Quadro 1 é apresentada uma síntese de algumas das principais vantagens e limitações do uso de indicadores ambientais.

Quadro 1 - Vantagens e limitações do uso de indicadores. Fonte: Direcção Geral do Ambiente (2000)

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • Avaliação dos níveis de qualidade ambiental • Capacidade de sintetizar a informação de carácter técnico/científico • Identificação das variáveis-chave do sistema • Facilidade de transmitir a informação • Bom instrumento de apoio à decisão e aos processos de gestão ambiental • Sublinhar a existência de tendências • Possibilidade de comparação com padrões e/ou metas pré-definida 	<ul style="list-style-type: none"> • Inexistência de informação base • Dificuldade na definição de expressões matemáticas que melhor traduzam os parâmetros seleccionados • Perda de informação nos processos de agregação dos dados • Diferentes critérios na definição dos limites de variação do índice em relação às imposições estabelecidas • Ausência de critérios robustos para a selecção de alguns indicadores • Dificuldade na aplicação em determinadas áreas como o ordenamento do território e a paisagem

Uma maneira de minimizar possíveis imprecisões decorrentes de leituras errôneas ou ausência de informações complementares é interpretar os indicadores dentro de seu contexto, retratando as condições de pressão, qualidade ou estado do meio e as respostas da sociedade (SANTOS, 2004).

A generalização do uso de indicadores ocorreu por volta de 1947, com a utilização do Produto Interno Bruto (PIB) associado a dados demográficos como indicador de desenvolvimento. Entretanto, foi a partir da Conferência de Estocolmo em 1972, o qual destacou a relação entre o desenvolvimento e as questões ambientais, que surgiram as primeiras tentativas de definição e classificação de variáveis para consolidar as tradicionais estatísticas econômicas ambientais. Durante a década de 1970, inclusive, começaram a ser publicados os primeiros relatórios nacionais e internacionais sobre o meio ambiente, baseados na adoção das primeiras políticas ambientais. Contudo a periodicidade, estrutura e as bases metodológicas destes primeiros relatórios eram bastante variadas, dificultando a comparação em termos internacionais (BRASIL, 2014).

O desenvolvimento substancial de indicadores, ambientais e de desenvolvimento sustentável, iniciou-se no final da década de 80 no Canadá e alguns países da Europa. Na década seguinte, mais precisamente no ano de 1992, aconteceu a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (Rio 92) ou Cúpula da Terra, em que os 179 países participantes assinaram a Agenda 21 Global. Neste documento contendo 40 capítulos, estipulou-se, dentre outras ações, a necessidade de reunir

informação ambiental e indicadores de desenvolvimento sustentável para monitorar o avanço em direção à sustentabilidade (MARTÍNEZ, 2007).

De acordo com Tayra e Ribeiro (2006), antes da Rio-92, a tentativa mais conhecida de construção de índices econômicos com inserção da variável ambiental foi o IBES (índice de bem-estar econômico sustentável), desenvolvido por Daly e Cobb (1989)¹. Atualmente, as principais experiências produzidas ao redor do mundo podem ser classificadas em dois tipos:

- Sistemas de indicadores: seguindo, em sua grande maioria, modelos derivados do “Livro Azul”²;
- Indicadores síntese: que buscam agregar dados de ordem econômica, biofísica, social e institucional. Dentre estes tipos, há uma grande diversidade de abordagens e ênfases, como monetárias (PIB verde e a poupança genuína), sociais (índice de sustentabilidade ambiental) e dados biofísicos (pegada ecológica).

No Brasil, de acordo com a Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe – CEPAL (2007), o panorama da aplicação de indicadores no Brasil é constituído pelas seguintes iniciativas:

- Sistema de Monitoramento da Biodiversidade (SIMBIO): programa elaborado em 1999 pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), apoiado pela agência de cooperação alemã GTZ, com o objetivo de produzir e disponibilizar informações sobre o *status* e as tendências da diversidade biológica nas Unidades de Conservação de Proteção Integral sob administração federal;
- GEO – Brasil, Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil: elaborado no ano de 2002 pelo Brasil em cooperação com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Este trabalho foi iniciado em 1997 quando o país se

¹DALY, H.; COBB, J. **For the Common Good**. Boston: Beacon Press, 1989.

² O Livro Azul sintetiza as principais contribuições da 4ª Conferência Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação para o Desenvolvimento Sustentável que têm como fios condutores o desenvolvimento sustentável e a inovação. Este documento focaliza as idéias-força que tiveram origem na Conferência sem constituir, contudo, uma compilação das diversas propostas apresentadas (BRASIL, 2010).

credenciou para realização de uma ampla avaliação de sua qualidade ambiental, utilizando a metodologia Pressão – Estado – Resposta (PER);

- GEO – Cidades: assim como o GEO – Brasil, também pertence à modalidade de indicadores de qualidade ambiental utilizando o modelo PER, porém com a particularidade de servir de projeto piloto para adaptação desta metodologia à problemática urbana;
- Indicadores de Desenvolvimento Sustentável do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE): elaborado pelo IBGE, utilizando como referência o “Livro Azul”, resultado do movimento internacional liderado pela Comissão para o Desenvolvimento Sustentável (CDS) das Nações Unidas. Para cada indicador foi elaborada uma ficha contendo a descrição de sua construção, justificativa, vínculos com o desenvolvimento sustentável e explicações metodológicas, acompanhadas de tabelas, figuras, gráficos e mapas ilustrativos que expressam sua evolução recente e diferenciações no território nacional. Este sistema de informação permite o acompanhamento da sustentabilidade no padrão de desenvolvimento do país, sendo uma importante obra sobre Indicadores de Desenvolvimento Sustentável do Brasil. Em 2004 foi viabilizado, de maneira inovadora, um sistema de informações com uma matriz de relacionamento em que são cruzados os indicadores de sustentabilidade, visualizando-se suas inter-relações;
- Livro Verde da Ciência e Tecnologia: desenvolvido em 2002 pelo Ministério da Ciência e Tecnologia com o objetivo de acompanhar o desempenho de suas políticas;
- Dados dos estados brasileiros com informações disponíveis na Internet sobre qualidade da água, qualidade do ar e licenciamento ambiental: compõem um sistema de monitoramento ambiental dos estados brasileiros.

Martínez (2001) sistematizou, de acordo com a experiência mundial acumulada, três gerações de indicadores:

- Os indicadores de primeira geração surgiram em 1980 e denominam-se indicadores ambientais ou de sustentabilidade ambiental. São exemplos: os indicadores ambientais de qualidade do ar, indicadores de contaminação da água

por coliformes, indicadores de desmatamento, de desertificação ou uso do solo;

- Os indicadores de segunda geração ou de desenvolvimento sustentável datam da década de 1990 até os dias atuais e possuem um enfoque multidimensional. Nesse período foram feitos avanços na construção e implementação de sistemas de indicadores de desenvolvimento sustentável compostos por indicadores ambiental, social, econômico e institucional.
- Os indicadores de desenvolvimento sustentável de terceira geração correspondem ao desafio atual em que se encontram grandes iniciativas no mundo. Estes indicadores buscam relatar o progresso em direção ao desenvolvimento sustentável de forma efetiva, utilizando um número limitado de indicadores vinculantes que incorporem dimensões e setores desde sua origem.

A utilização de indicadores para fundamentar as tomadas de decisão tem demonstrado ser útil, na medida em que direciona de forma mais eficiente o gerenciamento das políticas ambientais. Praticamente todos os estados-membros da União Europeia já publicaram documentos sobre indicadores, ambientais e de desenvolvimento sustentável. Os países da América Latina também têm participado ativamente no desenvolvimento de seus indicadores e a CEPAL promove um Programa de Capacitação em Gestão Ambiental para América Latina e Caribe. Já no Brasil, em outubro de 2005, ocorreu no Rio de Janeiro um curso chamado “Indicadores de Desarrollo Sostenible para América Latina y el Caribe” (GUIMARÃES, 2008).

2.3 Tipos de indicadores ambientais

Os indicadores ambientais são separados em diversos tipos, cada autor classifica-os de maneira distinta. Segundo Kraemer (2004), os indicadores ambientais podem ser divididos em:

- Indicadores absolutos: dados básicos sem análise ou interpretação, como por exemplo, kg de sucata de alumínio. Representam o consumo de recursos e a emissão de substâncias contaminantes, tais como, o consumo de energia em kilowates/hora ou a quantidade de resíduos em toneladas;
- Indicadores relativos: comparam os dados com outros parâmetros, por exemplo, kg de sucata de alumínio por tonelada de produto ou níveis absolutos de emissão

com outros dados significativos de referência. Enquanto os indicadores absolutos descrevem o grau de contaminação ambiental, os indicadores relativos demonstram se as medidas ambientais dão lugar às melhoras da eficiência;

- Indicadores de empresa, de centro de trabalho e de processo: podem referir-se a diferentes equipamentos e, conseqüentemente, ser obtidos a partir de dados de toda a empresa, de projetos ou centros individuais de trabalho e de departamento ou processo de produção específica;
- Indicadores relacionados com a quantidade e custo: os indicadores ambientais podem ter relação com quantidade, isto é, kilogramas, toneladas, etc. Devido à relevância cada vez maior dos custos na proteção ambiental, é possível desenvolver, simultaneamente, indicadores relativos aos custos (indicadores de custos ambientais) e à quantidade. A base destas avaliações de custo ambiental sempre é os valores absolutos das quantidades compradas ou eliminadas com os quais se aplicam os custos internos pertinentes, por exemplo: a quantidade de resíduos determina os custos proporcionais de eliminação de resíduos.

Outra classificação, elaborada por Rufino (2002), separa os indicadores ambientais em:

- Geológicos e geomorfológicos (geoindicadores): são definidos como magnitudes e tendências dos processos geológicos e fenômenos que acontecem na superfície da Terra num intervalo de tempo de um século ou menos. Podem ser classificados em: geológicos, geomorfológicos, geotécnicos e hidrogeológicos.
- Físico-químicos: são utilizados para avaliar as condições físico-químicas da água, solo e ar. Pode-se citar: matéria orgânica, temperatura, turbidez, sólidos totais, salinidade, potencial hidrogeniônico (pH), oxigênio dissolvido, entre outros.
- Hídricos: variáveis abióticas que indicam um processo ou estado do ecossistema aquático, caracterizando-o através de variáveis físico-químicas e suas variações espaço-temporais. Exemplos: oxigênio, profundidade, uso do recurso hídrico e tratamento de dejetos.
- Climáticos: indicam variações das condições atmosféricas devido à composição e presença de determinadas substâncias contaminantes, além de incluir variáveis do tipo meteorológicas. Exemplos: precipitação, temperatura, umidade relativa,

ventos, evapotranspiração, balanço hídrico, classificação climática, emissões atmosféricas, qualidade do ar, variações no nível de ruídos, etc.

- Bioindicadores: são variáveis biológicas, espécies ou populações que respondem a mudanças de um gradiente físico-químico, podendo mostrar um grau de tolerância, resistência, estresse ou morte. Um organismo indicador é escolhido por sua sensibilidade ou tolerância a várias classes de contaminantes ou os seus efeitos. Podem ser citados: fitoplâncton, macrófitas aquáticas, peixes, macroinvertebrados litorâneos, biodiversidade, biomassa, espécies raras, indicadores de desmatamento, entre outros.
- Bacteriológicos: indicam a presença ou a ausência de microorganismos patogênicos. Podem ser: coliformes fecais, coliformes totais, *streptococos* fecais, mesófilos aeróbios, mesófilos anaeróbios.
- Edafológicos: indicam as condições ambientais dos solos. Pode-se citar: aptidão de uso, classificação agroedafológica, características físico-químicas, cobertura vegetal, erosão e uso de fertilizantes.
- Paisagísticos: demonstram o aspecto estético e cultural de um determinado local. Citam-se: contrastes cromáticos, vista panorâmica e ângulo de incidência visual.
- Sociais: indicam o nível de desenvolvimento de uma determinada região, sendo exemplos os núcleos populacionais urbanos e rurais, educação, saúde, moradia, serviços básicos, atividades agrícolas, pecuárias, minerais, organizações comunitárias, sítios arqueológicos, população, crescimento econômico, entre outros.

Costa, Costa e Nascimento (2011) citam mais alguns tipos de indicadores voltados às questões ambientais:

- Indicadores socioeconômicos de qualidade de vida: saúde, renda, emprego, educação, transporte, satisfação e bem estar, demandas *versus* recursos, etc.
- Indicadores ecológicos: medem a proteção ambiental, biodiversidade, unidades de conservação etc.
- Indicadores de estrutura política/legal/institucional: respostas do poder público aos problemas ambientais, nível de conformidade legal de ações e iniciativas, organização e integração institucional, entre outros.

- Indicadores ambientais: envolvem diferentes dimensões ambientais simultaneamente.
- Indicadores hidrológicos: medem fluxos, estoques e disponibilidade de água.
- Indicadores demográficos: apontam as pressões sobre os recursos naturais, estado e dinâmica populacional.
- Indicadores de desenvolvimento sustentável: buscam aproximar-se da mensuração do nível de conformidade das políticas e modelos de gestão em relação ao desenvolvimento sustentável, crescimento econômico, proteção ambiental, justiça e equidade social.

2.3.1 Geoindicadores

Berger (1998) define geoindicadores como grandezas, frequências, taxas, ou tendências dos fenômenos geológicos da Terra que são significativas para estimar as mudanças ambientais ao longo de períodos de 100 anos ou menos. Indicadores geológicos proporcionam um quadro conceitual para avaliar mudanças nos componentes abióticos de ecossistemas e paisagens resultantes de processos naturais ou ações humanas. Também podem ajudar os políticos e público em geral a lembrar da realidade da mudança natural e da dificuldade de distingui-la das modificações humanas.

Estes indicadores permitem aos pesquisadores elaborar novas técnicas ou utilizar as metodologias existentes para revelar a degradação de uma área, para isso, podem-se usar dados coletados por meio de fotografias aéreas, imagens de satélite, dados climatológicos, estatísticos, datação, dentre outros (FRANÇA JUNIOR; VILLA, 2011).

O geoindicadores devem responder à quatro questões básicas, segundo Berger (1997):

- O que está acontecendo no ambiente? (quais as condições e tendências);
- Por que está acontecendo? (as causas são humanas e/ou naturais);
- Por que é importante? (quais os efeitos ecológicos, econômicos e na saúde);
- O que se pode fazer acerca disso? (em termos de planejamento e políticas).

De acordo com Higgins e Wood (2001), os geoindicadores podem ser avaliados e ter a significância determinada por meio de 10 critérios, citados a seguir:

1. Significância. Por que é importante monitorar este indicador?
2. A mudança é provocada pelo homem ou natural? Este geoindicador pode ser usado para distinguir a mudança natural da causada pelo homem? Se sim, como?
3. Ambiente onde é aplicável. Em qual configuração da paisagem este indicador seria usado?
4. Escala espacial. Em qual escala este geoindicador seria normalmente monitorado no campo?
5. Tipos de locais de monitoramento. Onde o geoindicador deve ser medido?
6. Método de medição. Como este indicador é medido em campo?
7. Frequência de medição. Quantas vezes esse geoindicador deve ser medido para estabelecer uma série temporal e tendência?
8. Limitações de dados e monitoramento. Quais são as dificuldades encontradas para adquirir dados de campo e de laboratório?
9. Aplicação ao passado e futuro. Como esse geoindicador pode ser aplicado à análise paleoambiental?
10. Possíveis limiares. Quais limiares e limites não podem ser excedidos sem mudanças ambientais drásticas ou ameaças à saúde humana e biodiversidade?

Geoindicadores são medidas das mudanças a curto prazo (<100 anos) nos processos da terra na superfície ou próximo à superfície, e de fenômenos que são significativos para o monitoramento e avaliação ambiental. Baseiam-se em conceitos e procedimentos padrão, podendo ser utilizados para averiguar mudanças em áreas fluviais, costeiras, desérticas, montanhosas, entre outras. Os geoindicadores avaliam tanto os eventos catastróficos quanto os graduais que são perceptíveis dentro da vida útil humana. A maioria lida com mudanças na paisagem (0.1-10 km) e meso-escala (10-100 km), mas alguns, como o nível relativo do mar, têm dimensões regional e global. Existem geoindicadores que são complexos e dispendiosos para medir, enquanto outros são simples e fáceis de aplicar (BERGER, 1997).

De acordo com Higgins e Wood (2001) alguns dos geoindicadores que permitem identificar processos geológicos e hidrológicos importantes para avaliar o estado do ambiente, mudanças nos ecossistemas e o modo como a ação humana afeta os sistemas naturais são:

1. Química dos corais e padrões de crescimento;

2. Crostas e fissuras na superfície do deserto;
3. Formação e reativação de dunas;
4. Magnitude, duração e frequência das tempestades de areia;
5. Atividade do solo congelado;
6. Flutuações das geleiras;
7. Qualidade das águas subterrâneas;
8. Química das águas subterrâneas na zona insaturada;
9. Nível de água subterrânea;
10. Atividade do *Karst*;
11. Nível e salinidade dos lagos;
12. Nível relativo do mar;
13. Sequência e composição do sedimento;
14. Sismicidade;
15. Posição da margem;
16. Falha de declividade (delizamentos de terra);
17. Erosão do solo e sedimento;
18. Qualidade do solo;
19. Fluxo do curso d'água;
20. Morfologia do canal do curso d'água;
21. Armazenamento e carga de sedimentos no curso d'água;
22. Regime de temperatura da subsuperfície;
23. Deslocamento da superfície;
24. Qualidade da água superficial;
25. Agitação vulcânica;
26. Extensão, estrutura e hidrologia das terras alagadas;
27. Erosão eólica.

2.3.1.1 Suscetibilidade à erosão

A erosão dos solos é um processo de desprendimento, transporte e deposição das partículas do solo, cujos principais agentes são o vento e a água. Entretanto a ação do homem por meio do uso e ocupação intensivo do solo desequilibra as condições naturais e aceleram os processos erosivos, originando a erosão acelerada. Este fenômeno é assim denominado devido à rapidez de ocorrência, acarretando grandes danos econômicos e

ambientais, tais como assoreamento, poluição e eutrofização das águas superficiais que prejudicam a quantidade e qualidade dos recursos hídricos (VALLE JUNIOR, 2008).

A facilidade com que o solo é removido por ação do vento ou água designa-se suscetibilidade à erosão (PEREIRA; LOMBARDI NETO, 2004). De acordo com Silveira (2002), a suscetibilidade à erosão de uma área depende de vários fatores, tais como: relevo, tipo de solo, chuva, cobertura vegetal e manejo do solo.

Geralmente, combina-se o grau de limitação das terras devido à erosão com outros fatores condicionantes e restrições para obter as classes de capacidade ou aptidão de uso das terras (MARTINI et al., 2006).

O solo possui características próprias, por isso, tipos distintos, sob uma mesma condição de uso e declividade, podem possuir diferente susceptibilidade à erosão (COELHO et al., 2006).

A textura, caracterizada pelo tamanho das partículas do solo, exerce influência sobre o arraste do material. Em solos arenosos, a água precipitada pode ser absorvida sem risco de destacamento de material, pois o espaço entre os poros é grande e existe boa capacidade de armazenamento. Entretanto, caso haja saturação deste solo e passe a ocorrer escoamento superficial, as partículas com baixo poder de agregação tendem a ser carregadas, originando o processo erosivo. Solos argilosos, por sua vez, apresentam baixa capacidade de infiltração de água, favorecendo o escoamento superficial, contudo, possuem maior resistência de agregação. Por essa razão, solos argilosos tendem a ser mais resistentes à erosão do que solos arenosos e também apresentam maior capacidade de agregação das partículas (LIMA, 2004).

Outro fator importante que influencia a suscetibilidade à erosão é a declividade. A análise da declividade das vertentes evidencia a distribuição das inclinações em uma área, característica que contribui para a instabilidade das encostas ocasionada pelo fluxo torrencial na superfície, acarretando processos erosivos e movimentos coletivos de materiais. Quanto maior o ângulo da declividade, mais rápido a energia potencial das águas pluviais se transforma em energia cinética, aumentando a velocidade das massas de água e sua capacidade de transporte, responsável pelos processos erosivos que esculpem as formas de relevo (SILVEIRA et al., 2006).

A cobertura vegetal também se faz importante frente à proteção do solo ao impacto das gotas de chuva. Além das raízes exercerem papel de estabilidade mecânica, maiores densidades vegetacionais proporcionam baixa exposição do solo, facilitando o processo

de infiltração e retardando o escoamento, principalmente se houver serrapilheira (SILVA, 2014).

Em relação ao uso do solo, devido ao fato de conectar procedimentos nos sistemas socioeconômico e natural, é considerado o ponto de ligação entre os meios sociais e naturais. Entretanto, muitas vezes, há conflitos quando a utilização de uma área não corresponde à sua aptidão. A espacialização de atributos ambientais e a geração de uma carta de conflitos auxiliam a identificar as incompatibilidades entre aptidão e uso atual do solo (HADLICH, 2006).

Uma ocupação considerada adequada é realizada de acordo com a capacidade de uso e manejo do solo. Além disto, práticas conservacionistas ajudam no controle da perda de solo e, em consequência, diminuem o processo de erosão, principalmente quando utilizadas de forma associada (ABDON, 2004).

As atividades urbanas e rurais influenciam diretamente os processos de retirada, transporte e deposição dos materiais do solo ao longo do tempo, pois essas atividades, além de promoverem uma reorganização das frações do solo, podem modificar as suas características, aumentando o escoamento das águas pluviais na superfície (TIZ; CUNHA, 2014).

De acordo com Imeson e Curfs (2009), as pastagens têm grande impacto na erosão porque os animais ao pisotear o solo podem compactá-lo e deslocar fragmentos rochosos, além de consumir ou destruir a vegetação que o protege. Além disso, Panachuki et al. (2006), destaca que a substituição da vegetação natural decorrente do uso e manejo inadequados do terreno na agropecuária, usualmente, desencadeia o processo de degradação do solo e dos recursos hídricos, tendo como consequências a diminuição da capacidade produtiva da terra e uma série de mudanças físicas, químicas, biológicas e hidrológicas.

Quanto à atividade agrícola, seus principais efeitos são observados na redução da produtividade da terra e altos custos de produção devido à necessidade de repor a fertilidade natural. A perda das camadas superficiais do solo torna o subsolo parte integrante do processo de cultivo, reduzindo a matéria orgânica e a aeração que são fatores fundamentais para o crescimento das plantas. O uso de fertilizantes químicos pode compensar a redução de nutrientes, porém a deterioração da estrutura do solo é difícil reverter (MARQUES, 2012).

O cultivo de cana-de-açúcar, de acordo com Scarpinella (2012), mesmo com a adoção crescente de técnicas direcionadas à conservação do solo, ainda pode ser

considerado um problema. Os períodos mais vulneráveis para a perda de solo são o plantio e logo após a colheita, pois a terra fica bastante suscetível aos danos causados pelas águas pluviais. Em casos em que é realizada a queima da palha, o solo fica ainda mais exposto à deterioração por erosão. Entretanto, na colheita mecânica, parte da palhada cobre o solo servindo como interceptora da água da chuva, reduzindo assim o processo erosivo nas áreas plantadas.

Já o crescimento urbano desordenado, em que a vegetação natural é removida e promove-se a impermeabilização do solo, causa diversos impactos no ciclo natural da água ao impedir sua infiltração no terreno e aumentar o volume do escoamento superficial. A diminuição do atrito da água com a superfície aumenta a velocidade do escoamento e reduz o tempo de permanência da água na bacia, elevando os picos de cheias e aumentando as áreas inundáveis, além de acelerar o processo erosivo (GAROTTI, 2008).

Na atividade mineradora, o processo de lavra provoca grandes degradações físicas, químicas e biológicas nos solos que alteram sua estrutura e a microbiota, além de causar a perda de vegetação. O uso de máquinas de grande porte que trafegam na área no momento da lavra e o empilhamento das camadas de solo retiradas para a abertura da cava contribuem para a compactação e degradação do terreno. O solo compactado apresenta maior densidade e alteração de outras propriedades físicas, tais como: porosidade, retenção de água, aeração, resistência à penetração de raízes e desenvolvimento da cobertura vegetal. Por isso, a compactação acarreta condições indesejáveis de infiltração e armazenamento de água que associadas a baixa porcentagem de cobertura vegetal, favorecem o aumento da taxa de escoamento superficial, facilitando o desenvolvimento de erosão hídrica (FRANCO, 2010).

Os processos de degradação do solo constituem um grave problema de escala mundial com consequências ambientais, sociais e econômicas significativas. Por esse motivo é importante estudos que avaliem a suscetibilidade dos terrenos aos processos erosivos para possibilitar uma melhor gestão das atividades desenvolvidas em bacias hidrográficas (CARVALHO, 2012). Ainda, de acordo com Hammes (2012), a erosão do solo é um bom indicador para verificar se a utilização do espaço está em desacordo com as premissas conservacionistas do desenvolvimento sustentável.

2.4 Construção e seleção de indicadores

Um conjunto de boas práticas é recomendado para a construção e utilização de indicadores com solidez analítica, credibilidade técnica e outras características essenciais para um bom monitoramento e apresentação de resultados (GOMES, 2011). Muitos autores escreveram sobre os atributos que indicadores ideais devem possuir e, a seguir, são apresentadas algumas destas características.

Indicadores influenciam a tomada de decisão e, por isso, é importante que as medidas utilizadas sejam adequadas. Indicadores pobres fornecem informações imprecisas e enganosas sobre o que está sendo medido. Um exemplo de indicador limitado pode ser uma medida que reflete mudanças em uma escala de tempo longa quando os tomadores de decisão demandam conhecimento sobre alterações em uma escala de tempo curta. Indicadores imprecisos podem conduzir reações políticas muito ou pouco reativas. Um dos desafios de selecionar bons indicadores é que pode ser mais fácil escolhê-los baseando-se na facilidade de medição ou disponibilidade de dados, ao invés do que precisa ser medido. É importante salientar que preencher lacunas de dados é um processo de recursos intensivos, limitando as opções em termos de seleção de indicadores (VAN WOERDEN et al., 2009).

Os indicadores devem ser de fácil compreensão e transparentes. O conjunto reunido deve contar uma "história" sobre a sequência de pressão e resposta e permitir que os legisladores saibam se as políticas estão funcionando. Indicadores devem dar sinais confiáveis de importantes tendências na situação atual e precisam ser comparáveis através do tempo. A utilização de métodos participativos é importante para definir e coletar indicadores de informação, pois, serve não só para diminuir os custos de monitoramento, mas também para envolver as pessoas locais mais profundamente na avaliação de recursos (WORLD BANK, 1997).

Segundo Meadows (1998), muitos grupos de estudos sobre indicadores iniciam seus debates fazendo uma lista das qualidades de um bom indicador. A maioria dos relatórios sobre o tema contém a seguinte lista:

- Clareza no valor: nenhuma incerteza sobre qual direção é boa e qual é ruim;
- Clareza no conteúdo: fácil compreensão, com unidades que façam sentido;
- Convincente: interessante, empolgante, sugestivo e de ação eficaz;
- Politicamente relevante: para todas as partes interessadas no sistema, inclusive a

de menor poder;

- Viável: mensurável a um custo razoável;
- Suficiente: não muita informação para compreender e nem pouca para dar uma visão adequada da situação;
- Oportuno: compilado sem atrasos;
- Escala apropriada: nem pouco e nem muito agregado;
- Democráticos: as pessoas devem ter acesso à escolha do indicador e aos resultados;
- Complementar: deve incluir o que as pessoas não podem medir por si mesmas (por exemplo: emissões radioativas ou imagens de satélite);
- Participativo: deve fazer uso do que as pessoas podem medir por si mesmas (como a qualidade da água do rio ou biodiversidade local) e compilá-lo para apresentar panoramas geográficos ou temporais;
- Hierárquico: para que um usuário possa aprofundar-se nos detalhes se desejado, mas também consiga obter a mensagem geral rapidamente;
- Medido em unidades físicas: dinheiro e preços são instáveis. Uma vez que o desenvolvimento sustentável é, em grande parte, relacionado com a matéria - comida, água, poluentes, florestas, casas, saúde - é melhor, sempre que possível, medi-lo em unidades físicas (toneladas de petróleo, ao invés de dólares em petróleo; anos de vida saudável, ao invés de gastos com assistência médica);
- Liderança: para que eles possam fornecer informações a tempo de agir;
- Experimental: objeto de discussão, aprendizagem e mudança constante.

Além das características listadas por Meadows (1998), indicadores úteis para a gestão devem cumprir dois requisitos básicos: ser normalizados e limitar sua produção histórica (temporalidade) à mesma norma ou forma de medida para permitir comparações. Ao eleger indicadores também deve-se ter uma concepção precisa das organizações e sistemas a serem gerenciados, o que pode apresentar diferentes níveis de facilidade ou complexidade. Portanto, diferentes tipos de indicadores existem para que adequações a organizações, objetivos, metas e missão possam ser efetuadas. É importante que os indicadores sejam produzidos com regularidade, formando séries temporais e permitindo visualizar as tendências no tempo e nos dados, além de possibilitar comparações internacionais e disponibilizar os dados para um público amplo (ROZADOS, 2005).

De acordo com o Banco Mundial (WORLD BANK, 1997), as propriedades desejáveis de um indicador são:

- Ser desenvolvido em acordo com o quadro conceitual e operacional;
- Claramente definido e fácil de compreender;
- Sujeito a agregação (de casa para a comunidade, e desta para a nação);
- Ser objetivo (independentemente do coletor de dados);
- Ter exigências de dados razoáveis e disponíveis ou que possam ser coletados a um custo limitado e dentro da capacidade do sistema estatístico do país;
- Ter a “apropriação” dos usuários;
- Ser limitado em números;
- Refletir entrada, processo ou resultado (ou, como usado na literatura ambiental, pressão, estado, resposta).

Já Lavorato (2003) cita que para a construção de indicadores, deve-se estar atento a alguns atributos que devem assegurar:

- Base Científica;
- Modelo Adequado;
- Temas prioritários;
- Compreensão e aceitabilidade;
- Sensibilidade adequada;
- Facilidade de monitoramento;
- Fontes de informação;
- Enfoque preventivo ou antecipatório;
- Trabalhar com valores discerníveis (padrões);
- Periodicidade adequada (coleta);
- Conjunto de indicadores com função de aplicabilidade.

Segundo Martins e Marini (2010), a formulação de indicadores requer um conjunto de passos necessários para assegurar a qualidade do sistema de medição do desempenho e uma aplicação satisfatória. Para a identificação inicial, uma extensa lista de indicadores deverá ser submetida a critérios de seletividade (em função da relevância

e do grau de significância) e viabilidade (em função da disponibilidade de dados e custos). Posteriormente, faz-se necessário verificar o peso de cada indicador, ou seja, o grau de relevância daquela métrica para o resultado final do indicador. Os pesos são úteis quando há um rol de indicadores para determinado objetivo, sendo relevante realizar ponderações de importância. Por fim, define-se as metas, que representam a quantificação dos indicadores e devem ser: realistas, desafiadoras, diretas, negociáveis e fundamentadas em séries históricas e tendências.

“O guia referencial para medição de desempenho e manual para construção de indicadores”, desenvolvido pelo Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (BRASIL, 2009), definiu os seguintes passos para a construção de indicadores:

- Identificação do nível, dimensão, subdimensão e objetos de mensuração;
- Estabelecimento dos indicadores;
- Validação preliminar dos indicadores com as partes interessadas;
- Construção de fórmulas, estabelecimento de metas e notas;
- Definição de responsáveis;
- Geração de sistemas de coleta de dados;
- Ponderação e validação final dos indicadores com as partes interessadas;
- Mensuração dos resultados;
- Análise e interpretação dos indicadores;
- Comunicação do desempenho e gerenciamento da mudança.

A Figura 3 mostra as etapas da construção dos indicadores que envolvem a definição do que mensurar, como mensurar, a fase de coleta de dados, a mensuração dos indicadores, análise e comunicação dos resultados. Seguir esses passos orienta a escolha de indicadores adequados aos objetivos que se deseja alcançar.

Figura 3 - Dez passos para a construção de indicadores.
Fonte: Brasil (2009)

Uma consideração importante é selecionar o número apropriado de indicadores, pois, em quantidade excessiva, pode-se criar uma sequência de erros aleatórios difíceis de interpretar, enquanto que poucos indicadores limitam o alcance da compreensão. A seleção de indicadores baseada em um conjunto seletivo de questões prioritárias é uma forma cada vez mais comum de limitar o número de indicadores (VAN WOERDEN et al., 2009).

Outro fator importante na seleção dos indicadores é quem os seleciona e como os

seleciona. Para Bellen (2002) existem duas abordagens dominantes: a abordagem *top-down* e a abordagem *bottom-up*. Na abordagem *top-down* os especialistas e pesquisadores definem o grupo de indicadores a ser utilizado frente aos tomadores de decisão, que podem adaptar o sistema às condições locais, mas não têm poder de definir e nem modificar os indicadores. A vantagem desta abordagem é fornecer uma aproximação cientificamente mais homogênea, mais válida em termos de indicadores e índices. A desvantagem é que o sistema não tem nenhum contato direto com as prioridades das comunidades e não considera as limitações de recursos naturais.

Na abordagem *bottom-up*, os grupos de indicadores são selecionados a partir de um processo participativo com a opinião dos diversos atores sociais envolvidos, como líderes, tomadores de decisão, comunidade, finalizando com a consulta a especialistas. A maioria das iniciativas regionais adota esta abordagem. A principal vantagem é que a comunidade realmente adota o projeto, bem como são estabelecidas as prioridades e a escassez para o sistema envolvido. A principal limitação desta abordagem é o foco estreito (BELLEN, 2002).

Outro procedimento que apoia a escolha do indicador é a ficha técnica que tem como objetivo realizar um processo de organização das informações pertinentes ao indicador que se deseja elaborar. Permite uma visão total do processo de seleção do indicador, as fontes de informação, as inter-relações com outros indicadores e uma resposta rápida às questões dos especialistas, que surgem durante o trabalho de desenvolvimento do indicador em discussão. Serve também de base de informação para revisões futuras do indicador. A ficha técnica é uma forma de identificar, justificar, relacionar e fundamentar revisões e a elaboração de novos indicadores. Entretanto, seu preenchimento total nem sempre pode ser cumprido, mas as lacunas também informam sobre o indicador desenvolvido. A ausência da ficha dificulta o processo de desenvolvimento do indicador, facilita a ocorrência de falhas e põe em risco a avaliação (VIEIRA, 2009). A Figura 4 mostra um modelo de ficha técnica.

MODELO DE FICHA TÉCNICA

1. Nome do indicador: Título resumido do indicador
2. Tipo: Posição em relação ao marco conceitual PER () Pressão () Estado () Resposta
3. Questão ambiental: identificar a questão ambiental a que está relacionado o indicador
4. Dimensão: () Social () Ambiental () Econômica () Institucional
5. Afinidade com o conceito de desenvolvimento sustentável: posição em relação aos capítulos da Agenda 21
6. Definição e objetivo: definição detalhada do indicador, base legal e objetivo a que se quer sinalizar pelo uso do indicador
7. Descrição da metodologia: descrição de métodos de medição, bases de cálculo, todos os termos e conceitos envolvidos na descrição e construção do indicador.
8. Especificação dos dados necessários: relação dos dados necessários à construção do indicador.
9. Unidade de medida: especificar as unidades de medida usadas na elaboração do indicador.
10. Metas a alcançar: identificar planos, programas de políticas públicas, acordos e convenções nacionais, regionais e internacionais.
11. Periodicidade: periodicidade dos dados potenciais. Discutir sobre a necessidade de informar mais detalhes.
12. Fontes de informação: instituições geradoras de dados potenciais. Comentários sobre a qualidade e características dos dados.
13. Limitações do indicador: esclarecer dificuldades conceituais, de definições, de base de dados e de dados de pesquisa. Necessidade de novas técnicas específicas para melhor identificar o indicador.
14. Inter-relação com outros indicadores: identificar outros indicadores que auxiliam a interpretação do indicador escolhido.
15. Instituições que participam no desenvolvimento do indicador: identificar as instituições que participaram na elaboração do indicador, incluindo o responsável e informações para contato, como telefone.
16. Referências bibliográficas: indicar os documentos, estudos e artigos técnico-científicos que fundamentam a construção e escolha do indicador.

Figura 4 - Modelo de ficha técnica para a construção de indicadores.

Fonte: Vieira (2009)

Mesmo com a intenção de demonstrar todos os princípios de boas práticas de construção em um conjunto de indicadores, muitos autores especializados neste tema afirmam que a possibilidade de encontrar todos estes critérios é pequena. Ao julgar os princípios considerados mais importantes pelos envolvidos, torna-se possível desenhar e selecionar indicadores que auxiliem a sociedade a tomar decisões e realizar planejamentos, além de ajudar a entender o que está acontecendo no ambiente analisado por meio de medidas que refletem os valores da sociedade (GOMES, 2011).

2.5 O modelo Pressão-Estado-Resposta (PER)

Quando opta-se por trabalhar com um conjunto de indicadores obtém-se riqueza de informações, porém esse caminho produz alguns questionamentos: que indicadores selecionar? Como não ficar perdido (afogado em números) com essa quantidade de informações? Para isso, existem os marcos ordenadores (*frameworks*), que orientam a coleta, organizam as informações e ajudam na interpretação e na comunicação (CARVALHO; BARCELLOS, 2009).

Um marco ordenador pode ser uma proposta de classificação dos indicadores segundo temas e sub-temas, ou estar intimamente relacionado a uma concepção teórica específica sobre o fenômeno estudado, facilitando a interpretação dos indicadores dentro da lógica e dos paradigmas próprios desta concepção. Nesta situação, o marco ordenador ganha uma nova condição, passando a ser reconhecido como um marco conceitual, porém a denominação modelo é mais utilizada na literatura. Entretanto, é mais preciso usar os termos marco ordenador, estrutura ou esquema (SCANDAR NETO, 2006).

Segundo Martínez (2005) existem quatro tipos principais de marcos ordenadores tratando das questões ambientais e desenvolvimento sustentável, a saber:

- Simples de componentes ambientais: neste caso, estipula-se que o ambiente é constituído por uma série de componentes que podem ser organizados e distinguidos segundo diferentes critérios. Todos os componentes do meio ambiente (água, ar/atmosfera, biota e terra/solo) podem ser subdivididos com o propósito de construir estatísticas e indicadores, em quantidade e qualidade, ou de acordo com o ponto de vista do marco ordenador Pressão - Estado - Resposta (PER) da OECD;
- Desenvolvimento sustentável: além das variáveis ambientais, incorpora outras três dimensões (econômica, social e institucional) que em combinação dinâmica medem o processo de desenvolvimento sustentável. Muitos países e especialistas afirmam que esta abordagem, embora valiosa, não permite integrar a sustentabilidade em uma só perspectiva e de modo simultâneo. Por exemplo, não se resolve qual leitura deve ser feita se os indicadores econômicos estão melhorando, enquanto os ambientais deterioram profundamente em um determinado país;
- Marco ordenador do capital natural, sustentabilidade fraca e forte: segundo este

marco ordenador a condição de sustentabilidade é a manutenção de um estoque ou acervo de capital natural ao longo do tempo. É uma alternativa válida para medir o desgaste do patrimônio ambiental dentro da agenda de políticas públicas utilizando a linguagem econômica. As estatísticas que emergem dessa abordagem são de acervo e fluxo, relacionadas com a contabilidade ambiental e concebidas como satélites das contas nacionais. Pode ser citado como exemplo o PIB verde;

- Marco sistêmico da relação sociedade/natureza: desde os anos 70 estão sendo desenvolvidos marcos referenciais sistêmicos ao redor do mundo para dar conta das relações recorrentes entre sociedade e natureza, com alternativas variadas e complexas. A vantagem de selecionar este tipo de marco de referência para desenvolver estatísticas e indicadores ambientais e de sustentabilidade é que, a partir de um ponto de vista científico, a sustentabilidade é a rigor uma categoria relacional e sistêmica e não pode ser capturada adequadamente sem utilizar um enfoque complexo e de sistemas.

Conforme mencionado anteriormente, um modelo é um recurso analítico com o propósito de retratar a realidade a partir da definição de um conjunto de variáveis, ou aspectos da realidade que se pretende representar e podem ser vistos/definidos/medidos de forma quantitativa ou qualitativa por meio de indicadores. Entretanto, assume-se que a realidade é um todo complexo e os modelos, ao incluírem apenas algumas variáveis para representá-la, serão sempre recursos limitados, revelando e escondendo, deixando de fora muitas variáveis potencialmente importantes e contendo limitações para estabelecer os padrões de comportamento entre as variáveis. Em suma, todo modelo é limitado, mas a limitação deve ser minorada por meio da escolha das variáveis mais relevantes, incluindo o que mais importa e excluindo o que não importa. Modelos são, portanto, um conjunto de indicadores relacionados (BRASIL, 2009).

O Modelo PER, acrônimo de “Pressão – Estado – Resposta”, é um marco ordenador bastante utilizado para apresentação de estatísticas e indicadores ambientais. Foi desenvolvido pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) que regularmente publica seus indicadores nesse formato (KEMERICH et al., 2013).

O ponto de partida do modelo PER é um marco referencial de componentes ambientais, mas não fica restrito a isso, pois, também incorpora dimensões econômicas, sociais e institucionais. Nesse sentido pode ser inserido no marco referencial de

desenvolvimento sustentável (CARVALHO et al., 2008).

Busca-se com a utilização do modelo PER, classificar e sistematizar conjuntos de indicadores para facilitar a observação das relações de causa e efeito e explicitar os âmbitos que compõem o meio, ou seja, o natural, o antrópico, antropizado, institucional, econômico e o social (SANTOS, 2004).

Este modelo baseia-se na ideia de que as atividades humanas exercem pressões sobre o meio ambiente e afetam a qualidade e quantidade de recursos naturais (estado). A sociedade, em contrapartida, responde a estas mudanças adotando políticas ambientais, econômicas e setoriais, tomando consciência das mudanças ocorridas e adaptando-se a nova condição (respostas da sociedade). O modelo PER tem como vantagem evidenciar estes elos para ajudar os tomadores de decisão e o público a perceber a interdependência entre as questões ambientais e as outras esferas da sociedade (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 2002). A Figura 5 representa o ciclo do modelo de abordagem PER.

Figura 5 - Modelo Pressão - Estado - Resposta (PER)

Fonte: Organisation for Economic Co-operation and Development (2002)

Segundo a Organisation for Economic Co-operation and Development (1999), o modelo PER divide as estatísticas e indicadores ambientais nas seguintes categorias:

- **PRESSÃO:** pressões exercidas sobre o meio ambiente e recursos naturais

decorrentes das atividades humanas. Essa categoria abrange pressões indiretas e ocultas que atuam como forças condutoras para questões ambientais (isto é, a própria atividade e tendências de importância ambiental), bem como pressões diretas ou imediatas (ou seja, o uso de recursos e a descarga de poluentes e resíduos materiais). Indicadores de pressões ambientais estão intimamente relacionados com a produção e padrões de consumo, refletindo, muitas vezes, emissão ou a intensidade de uso dos recursos, juntamente com as mudanças e tendências relacionadas ao longo de um determinado período. Estes indicadores também podem ser usados para mostrar o progresso ao dissociar as atividades econômicas das pressões ambientais e ao concretizar os objetivos nacionais e compromissos internacionais (por exemplo: metas de redução de emissões);

- **ESTADO:** condições ambientais relacionadas com a qualidade do ambiente e os efeitos ou impactos associados, e a qualidade e quantidade dos recursos naturais. Indicadores de condições ambientais são projetados para dar uma visão geral da situação (o Estado) em relação ao meio ambiente e seu desenvolvimento ao longo do tempo. Exemplos: concentração de poluentes no meio ambiente e o estado de vida selvagem e das reservas de recursos naturais;
- **RESPOSTA:** indicadores que mostram o quanto a sociedade responde às preocupações ambientais por meio de políticas (gerais, setoriais e econômicas) e mudanças na consciência e comportamento. Eles referem-se às ações e reações individuais e coletivas destinadas a: reduzir, adaptar-se ou prevenir os efeitos negativos das atividades humanas sobre o meio ambiente; interromper ou reverter os danos ambientais já causados; preservar e conservar a natureza e os recursos naturais. São exemplos de indicadores de respostas: taxas e subsídios ambientais e taxa de reciclagem de resíduos.

É pertinente ressaltar que a Direcção Geral do Ambiente (2000) considera os indicadores de Estado sinalizadores da qualidade do ambiente em um dado horizonte espaço/tempo. Sendo assim, além das condições ambientais decorrentes das pressões, também abrangeriam indicadores de sensibilidade, risco e qualidade ambiental.

Há três variantes do modelo PER: FER, PEIR e FPIER. O modelo FER substitui a pressão pela força motriz (F) e foi adotado no ano de 1995 pela Comissão de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas no livro azul. A força motriz representa o que está por trás das pressões, isto é, são as atividades humanas que provocam impactos

sobre o meio ambiente, como por exemplo, a emissão de poluentes pela atividade industrial, o crescimento demográfico e a urbanização. O modelo PEIR inclui o impacto (I) no modelo tradicional desenvolvido pela OECD e é utilizado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP). Por fim, o modelo FPIER inclui simultaneamente a força motriz (F) e o impacto (I) no PER. A variante impacto refere-se aos indicadores que medem as consequências da degradação ambiental sobre o homem e seu entorno, por exemplo, a incidência de doenças respiratórias associadas à poluição do ar (CARVALHO; BARCELLOS, 2009).

A vantagem do modelo PER e suas variantes é apresentar uma visão conjunta dos vários componentes de um problema ambiental. Este modelo facilita o diagnóstico do problema e a elaboração de políticas públicas, pois, além de constatar a degradação ambiental, também revela seus impactos, causas, o que está por trás dessas causas, e as ações que estão sendo tomadas para melhorar a situação (CARVALHO; BARCELLOS; MOREIRA, 2009).

Quanto às desvantagens, a primeira delas é que o modelo PER não traz metas de sustentabilidade e não informa sobre as funções ecológicas e estruturas dos ecossistemas, e diz pouco ou nada sobre a saturação da capacidade de carga dos ecossistemas ou erosão da resiliência ecossistêmica diante de processos específicos. Também é fundamentado exclusivamente em dados existentes e, por isso, concentra-se em processos estressores que estão em evidência nos dias de hoje, tais como: desmatamento de bosques, mudanças climáticas e problemas de biodiversidade. Este fato resulta no desenvolvimento de políticas remediadoras, de curto prazo e que demonstram privilegiar os estoques de recursos existentes, mas não protege com igual força os fluxos de insumos provenientes da ecosfera, tecnosfera ou antroposfera (MARTÍNEZ, 2001).

Martínez (2001) também menciona como uma das principais críticas a este modelo a tendência de induzir a leitura de causalidade linear dos indicadores de pressão para os de estado e destes para os de resposta. Esta forma do usuário interpretar o modelo PER simplifica excessivamente uma situação complexa que envolve diferentes interações de fenômenos sociais, econômicos e ambientais.

Mesmo com as limitações do modelo PER, a OECD continua utilizando-o e também será adotado neste trabalho, pois, conforme argumenta Carvalho et al. (2008), a causalidade linear é um bom ponto de partida para analisar um problema ambiental e metas de sustentabilidade podem ser incorporadas. Além disso, o modelo não necessariamente induz a adoção de ações corretivas, dado que ações de caráter preventivo

podem ser incluídas.

Mesmo que em muitos casos as relações entre pressão-estado-resposta não sejam lineares, a organização dos indicadores dentro do modelo PER permite a visualização de algumas interações existentes e proporcionam uma visão do processo de desenvolvimento e sua relação com o meio ambiente (RUFINO, 2002).

O Quadro 2 resume os principais aspectos metodológicos de estudos que utilizam o modelo PER e embasaram esta pesquisa.

Quadro 2 - Síntese de estudos utilizando o modelo PER

AUTOR	OBJETIVOS	INDICADORES UTILIZADOS
GEO CIDADE DE SÃO PAULO (2004)	Oferecer um panorama do estado do meio ambiente no município de São Paulo, sintetizando os resultados do processo de avaliação ambiental da cidade efetuado durante o ano de 2003 e início de 2004.	Pressão: 23 indicadores Estado: 19 indicadores Impacto: 19 indicadores Resposta: 22 indicadores
PAULA JUNIOR; POMPERMAYER (2007)	Utilizar indicadores de sustentabilidade ambiental selecionados com base no diagnóstico da área de estudo e na estrutura conceitual Pressão-Estado-Resposta (PER) para avaliar a situação dos recursos hídricos da UGRHI 5	Pressão: índice de urbanização; índices de captação e de consumo urbano de água per capita; índices de consumo urbano, industrial, agrícola e global de água em relação à disponibilidades hídricas mínimas na forma de Q7,10 e de Q95% Estado: o índice de cobertura vegetal natural e a carga poluidora remanescente urbana e industrial Resposta: índice de reflorestamento, índices de atendimento urbano por abastecimento de água, coleta e transporte e tratamento de esgotos

Quadro 3 - Síntese de estudos utilizando o modelo PER (continua)

KEMERICH et al. (2013)	Demonstrar o uso de indicadores de sustentabilidade ambiental aliado à análise de vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea em bacia hidrográfica	Propõe o uso de indicadores hidrogeológicos relacionados ao Índice DRASTIC sistematizados no modelo PER
COSTA (2013)	Construir um sistema de indicadores de sustentabilidade como princípio norteador para o processo de desenvolvimento sustentável, planejamento e gestão dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Almada – BA	35 indicadores estruturados no modelo PER e abrangendo as dimensões: social, ambiental, econômica e institucional
OLIVEIRA et al. (2014)	Mapear a cobertura da terra e analisar as métricas de fragmentação da paisagem da bacia hidrográfica do alto São Bertolomeu para utilizar os dados como indicadores de pressão e estado no modelo PER	Pressão: atividades agropastoris, pivô central, reflorestamento e área construída Estado: vegetação florestal, campestre e savânica

2.6 Ponderação e análise dos indicadores ambientais

Após definir o conjunto de indicadores, pode-se iniciar a construção de fórmulas e estabelecimento de metas. A fórmula descreve como o indicador deve ser calculado, possibilitando clareza com as dimensões avaliadas, tornando-o inteligível, compatível com a coleta de dados, específico, uniforme na interpretação dos resultados e útil para a tomada de decisão. Cada fórmula possui uma unidade de medida que concede um significado ao resultado e deve ser composta seguindo uma linha de raciocínio para facilitar a análise e a comparação com uma série histórica (PALVARINI, 2010).

Na fase de análise dos indicadores, as informações coletadas no campo são organizadas em um banco de dados e transformadas em diagnósticos e estatísticas que geram conhecimento sobre o fenômeno estudado. A forma de representar a informação deve ser de fácil entendimento e difusão. Os resultados, sempre que possível, devem ser apresentados em forma de gráficos, mapas ou quadros comparativos para possibilitar uma compreensão natural, intuitiva e lógica (SERVIÇO SOCIAL DA INDÚSTRIA, 2010).

A escolha dos instrumentos de medição e análise é influenciada pelo tipo de informação disponível: quantitativa ou qualitativa. De acordo com Filho (2002),

indicadores quantitativos permitem medir e são, em geral, expressos em quantidades e percentuais resultantes de apurações, contabilizações e estatísticas. Dependendo da forma de aquisição do dado primário, tendem a ser mais objetivos, parametrizáveis e comparáveis. Enquanto indicadores qualitativos direcionam-se à verificação e também podem ser traduzidas em números, mas são essencialmente fruto de algum tipo de avaliação qualitativa decorrente da observação. Às vezes podem ser subjetivos ou dependentes do observador, porém em muitas situações são a única forma de mensuração viável.

Segundo o Serviço Social da Indústria (2010), organizando os dados do estudo será possível fazer análises pertinentes sobre a situação atual e tomar decisões de maneira objetiva e focada nas reais necessidades e oportunidades existentes. Entretanto, para avaliar e julgar a evolução do indicador é preciso ter os seguintes parâmetros:

- Variações do indicador ao longo do tempo;
- Distribuição territorial das ocorrências;
- Diferenças e particularidades de cada grupo;
- Comparação com as metas;
- Especificações e valores recomendados;
- Comparação com uma referência.

É importante ter metas que possam ser medidas para controlar e obter melhorias na qualidade do meio ambiente, pois, metas imensuráveis são mais difíceis de serem alcançadas. Investe-se naquilo que pode ser medido, por isso, sem uma metodologia de avaliação legítima e confiável, há o risco de obter resultados imprevistos e indesejados (HALES; PRESCOTT-ALLEN, 2005).

A crescente preocupação com a qualidade do meio ambiente aprofundou os esforços para desenvolver instrumentos que pudessem medir o progresso em direção à sustentabilidade. A globalização também contribuiu para intensificar a parametrização das questões socioambientais (GUIMARÃES; FEICHAS, 2009).

Frequentemente é necessário atribuir graus diferentes de importância aos parâmetros ou próprios indicadores por meio de pesos ou expoentes. A ponderação, algumas vezes, ultrapassa o objetivo de expressar a importância dos indicadores quantitativamente e pode valorizar critérios que avaliam as alternativas propostas nas

comparações finais do estudo. Apesar da existência de inúmeros métodos, a valorização das informações é uma tarefa difícil e, muitas vezes, subjetiva e dependente de fatores como o tipo de formação do pesquisador e o grau de informação que ele tem sobre os elementos a serem valorados (SANTOS, 2004).

Para minimizar a subjetividade é importante eleger valores de referência nacionais e/ou mundiais, tais como, indicadores de países com níveis diferentes de desenvolvimento humano e de renda, padrões definidos na legislação ambiental, metas estabelecidas nacional e internacionalmente e metas fixadas para o local. A partir destes valores de referência são definidos os limites dos intervalos da escala de desempenho para cada indicador local, apontando condições que variam de insustentável para sustentável (KRONENBERGER; CARVALHO; JUNIOR, 2004).

O julgamento de valores aparece nos indicadores de diversas maneiras. Pode estar diretamente envolvido no processo de mensuração, como na avaliação dos valores estéticos de uma paisagem, ou na adição de um valor de qualidade à condição observada ou medida como, por exemplo, as recomendações de organismos internacionais acerca da concentração máxima de um agente poluente considerado prejudicial à saúde humana em determinado ambiente. No caso de indicadores que agregam diferentes variáveis, cada uma é ponderada e introduz um julgamento de valor. Quando se estabelecem determinados alvos a serem atingidos, também se embute o julgamento de valor, possibilitando proceder a avaliação de desempenho (RIBEIRO, 2002).

Estudos ambientais têm demonstrado que as condições para os diversos ecossistemas variam segundo as qualidades biológica, física e química. Estas qualidades podem ser quantificadas por meio de medidas, indicadores e índices que descrevam, retratem e controlem as condições do meio ambiente. São estabelecidos padrões de qualidade para o ar, água e solo, assim como padrões de qualidade visual e auditiva do meio ambiente (MARTOS; MAIA, 1997).

Segundo Figueiredo (1996), as principais finalidades de mensurar um processo por meio de indicadores ambientais são:

- Monitoramento do estado do meio ambiente e sua evolução ao longo do tempo;
- Avaliação do desempenho dos projetos, programas e planos;
- Controle gerencial do processo visando melhorias;
- Demonstração ao público interessado da melhoria contínua dos produtos e/ou

processos;

- Auxílio no desenvolvimento de planos futuros.

Diferentes métodos podem ser utilizados para ponderar e analisar os indicadores, possibilitando a avaliação e comparação dos resultados. Baseado na tabela produzida por Passo e Pires (2008), o Quadro 4 resume algumas metodologias de análise de indicadores.

Quadro 4 - Síntese de metodologias de ponderação e análise de indicadores ambientais

Autor	Objetivo	Técnica de coleta	Tipo de variável	Metodologia de análise
RODRIGUES; CAMPANHOLA (2003)	Apresentar o sistema de Avaliação Ponderada de Impacto Ambiental de Atividades do Novo Rural (APOIA-Novo Rural)	Questionário e análises laboratoriais	Quantitativa	Cálculo do Índice de Impacto Ambiental da atividade rural por meio de matriz de ponderação e funções matemáticas
RODRIGUES (2010)	Estabelecer e aplicar um sistema de indicadores intraurbanos na cidade de São Luís (MA) para mensurar a desigualdade socioambiental	Dados censitários de São Luís (MA) elaborados pelo IBGE (ano base de 2000)	Quantitativa	Técnicas estatísticas multivariadas: Análise Fatorial e Análise de Agrupamentos
DIAS; GOMES; ALKMIM (2011)	Caracterizar e analisar a qualidade ambiental da área urbana da bacia do Ribeirão do Lipa por meio de indicadores de infraestrutura viária, sanitária e cobertura vegetal	Levantamento bibliográfico e consultas a órgãos públicos	Quantitativa	Utilização de equação para agregar indicadores e produzir um índice sintético, denominado Índice de Qualidade Ambiental Urbana

Quadro 5 - Síntese de metodologias de ponderação e análise de indicadores ambientais (continua)

RIBEIRO et al., (2012)	Utilizar o modelo PER no diagnóstico da condição ambiental do parque municipal da Água Vermelha em Sorocaba	Observação <i>in loco</i> e entrevistas	Quantitativa e Qualitativa	Utilização da fórmula da Condição Ambiental Atual. Condição Ambiental atual = Resposta + (- Pressão + (- Estado))
KEMERICH et al. (2013)	Demonstrar o uso de indicadores em conjunto com a análise de vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea em bacia hidrográfica	Este trabalho consiste em uma proposta de análise, por isso não houve coleta de dados	Por ser tratar de uma proposta metodológica, este trabalho não dispõe de nenhum tipo de variável	Propõe o uso da metodologia de índice DRASTIC que utiliza indicadores hidrogeológico
DENÚBILA (2013)	Desenvolver um método para elaboração de um diagnóstico das atividades minerárias no município de São Carlos.	Campo, IBGE, Departamento Nacional de Produção Mineral, EIA/RIMA do condomínio DAMHA	Quantitativa e Qualitativa	Uso do Processo Analítico Hierárquico (AHP)

2.6.1 Análise de Agrupamentos

O mapa de agrupamentos é uma técnica de autocorrelação espacial muito utilizada em geoprocessamento para representar e analisar as informações geográficas reunidas de acordo com a proximidade de valores que apresentam (MEDEIROS, 2016). Este mapa é uma ferramenta de análise espacial produzido por meio de um método denominado Análise de Agrupamentos.

As análises espaciais são uma ferramenta de auxílio na resolução de problemas relacionados ao gerenciamento do ambiente, principalmente por possibilitar sintetizar e exibir dados de muitas maneiras, bem como, combinar múltiplos temas para descobrir suas relações espaciais (CRUZ; CAMPOS, 2005).

Compreender a distribuição espacial de dados constitui um grande desafio para esclarecer questões centrais em diversas áreas do conhecimento, como por exemplo: saúde, meio ambiente, geologia e agronomia. A disponibilidade de sistemas de informação geográfica (SIGs) com baixo custo e interfaces acessíveis têm contribuído para o desenvolvimento de estudos no qual a visualização espacial das variáveis em mapas é importante na análise dos resultados. Com um banco de dados e uma base geográfica, o SIG é capaz de produzir um mapa colorido permitindo a visualização do padrão espacial do fenômeno (CÂMARA et al., 2004).

A análise espacial conecta o domínio cartográfico e as áreas de análise aplicada, estatística e modelagem, permitindo combinar variáveis georreferenciadas para criar e estudar novas variáveis. O termo analisar significa decompor em partes ou componentes com o intuito de identificar a estrutura e compreender um sistema. A realidade complexa do espaço geográfico pode ser fragmentada para produzir uma nova informação que permita compreendê-la melhor, de forma isolada ou integrada (ROSA, 2011).

De acordo com CÂMARA et al. (2004) a ênfase da análise espacial é mensurar propriedades e relações, considerando a localização do fenômeno em estudo de forma explícita, ou seja, a questão central desta análise é incorporar o espaço à interpretação de dados. Este método de interpretação da informação é composto por um conjunto de procedimentos encadeados para escolher um modelo inferencial, e inicia-se com a análise exploratória e a visualização dos dados, em geral por meio de mapas. Deste modo, é possível descrever a disposição das variáveis do estudo, identificar observações atípicas (*outliers*) e procurar padrões na distribuição espacial.

Um conceito importante para compreender os fenômenos espaciais é a dependência espacial, característica natural da representação de dados em subdivisões territoriais que pode ser entendida como a tendência de uma variável associada à determinada localização de assemelhar-se mais ao valor das suas amostras vizinhas. A necessidade de quantificar a dependência espacial existente em um conjunto de dados induziu o desenvolvimento da chamada estatística espacial (PAIVA, 2007).

A expressão computacional do conceito de dependência espacial é a autocorrelação espacial, termo derivado do conceito estatístico de correlação e utilizado para se referir à relação entre duas variáveis aleatórias. O prefixo “auto” indica que a medida de correlação é realizada com a mesma variável aleatória, em locais distintos do espaço. Para mensurá-la podem-se utilizar diferentes indicadores, porém todos baseados na mesma idéia: verificar como a dependência espacial varia, a partir da comparação entre

valores de uma amostra e seus vizinhos (CÂMARA et al. 2004).

Existem diferentes formas de medir a dependência espacial. O índice de Moran (I) é a estatística mais difundida e mede a autocorrelação espacial a partir do produto dos desvios em relação à média. Este índice é uma medida global da autocorrelação porque revela o grau de associação espacial presente no conjunto de dados (PAIVA, 2007).

De acordo com Morettini (2009), este índice é uma medida importante, pois sintetiza inúmeras possibilidades de padrões de associação local entre as amostras georreferenciadas. A hipótese nula testada pelo Índice de Moran é de independência espacial e seu valor varia de -1 a +1, em que: valores próximos de zero indicam ausência de autocorrelação espacial, positivos (entre 0 e +1) revelam autocorrelação direta e negativos (entre 0 e -1) autocorrelação inversa. O Índice de Moran para N observações é dado por:

$$I = \frac{N}{W_0} \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

onde:

- $x_1, x_2, \dots, x_N$ são as observações de N locais;
- N é o número de observações;
- w_{ij} são os elementos da matriz de contigüidade binária normalizada (W) e representam a proximidade de diferentes localizações. Se i e j são locais vizinhos ($i \neq j$), w_{ij} terá o valor unitário, caso contrário terá o valor nulo;
- x_i e x_j são os valores da variável analisada e $w_0 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w(i, j)$.

Quanto à Análise de Agrupamentos, ou *cluster analysis* em inglês, é um termo usado para descrever diversas técnicas numéricas que têm como objetivo fundamental classificar os valores de uma matriz de dados em grupos discretos com grande similaridade interna e grande dissimilaridade externa. Esse método integra a Estatística Multivariada e procura por agrupamentos homogêneos de elementos em um número conveniente de grupos relacionando-os por meio de coeficientes de similaridades ou de correspondência (LANDIM, 2000).

Diferente de outras técnicas essencialmente estatísticas, a análise de agrupamento trata-se de um método descritivo, dado o seu caráter não inferencial. Geralmente, esse método não fornece soluções únicas, visto que uma grande variedade de resultados pode

ser obtida a partir de uma mesma massa de dados. Com isso, a subjetividade do pesquisador tem grande influência ao estudar o agrupamento das observações de uma amostra (PRATA; FREITAS, 2007).

Diversas técnicas foram desenvolvidas para auxiliar na formação dos agrupamentos devido à dificuldade de examinar todas as combinações de grupos possíveis em um grande volume de dados (DONI, 2004). Segundo Milligan (1996), existem sete passos principais para realizar uma análise de agrupamento fiável:

1. Selecionar os elementos a serem agrupados;
2. Eleger as variáveis dos elementos que serão usadas no agrupamento;
3. Padronizar as variáveis escolhidas;
4. Escolher uma medida de similaridade ou dissimilaridade entre os grupos;
5. Selecionar o método de agrupamento;
6. Determinar o número de grupos;
7. Interpretar e testar os resultados.

Han, Kamber e Pei (2012), listam como características ideais de uma análise de agrupamentos:

- Ser capaz de agrupar amostras de dados de diferentes tamanhos para evitar resultados tendenciosos;
- Capacidade de lidar com diferentes tipos de atributos, isto é, não se ater somente à dados numérico, analisando também informações categóricas, binárias ou uma mistura destes tipos de dados;
- Identificar grupos de forma arbitrária: a maioria dos agrupamentos é obtida com base em medidas de distância Euclidiana ou Manhattan que tendem a encontrar aglomerados esféricos, isto é, com tamanho e densidade semelhantes. No entanto, um grupo pode ser de qualquer forma, por isso, é importante desenvolver algoritmos que permitam obter leituras de fenômenos interessantes e não esféricos.
- Exigir o domínio de conhecimento para determinar parâmetros de entrada: o pesquisador deve possuir conhecimentos para fornecer de parâmetros de entrada, tais como o número desejado de grupos. Os parâmetros são muitas vezes difíceis

de determinar, especialmente para grandes conjuntos de dados que exijam muito conhecimento do pesquisador.

- Capacidade de lidar com o ruído dos dados, isto é, valores atípicos e/ou imprecisos que afetam a qualidade do agrupamento;
- Agrupamento incremental e insensibilidade à ordem de entrada: alterações incrementais (que representam os dados mais recentes) podem ocorrer a qualquer momento. Por esse motivo, é importante ter a possibilidade de incorporar atualizações aos grupos existentes ao invés de recalcular um novo agrupamento. Além disso, uma análise insensível à ordem de entrada dos dados é necessária para que os grupos não sejam dramaticamente alterados a cada adição de informações;
- Habilidade de agrupar conjuntos de dados com numerosas dimensões e atributos;
- Formar grupos baseados em restrições;
- Interpretabilidade e usabilidade: os resultados devem ser interpretáveis, compreensíveis e utilizáveis.

Segundo Quintal (2006) existem dois métodos de construção de agrupamentos:

- Hierárquicos: formam uma hierarquia, pois os grupos podem ser disjuntos ou contidos um no outro, ou seja, os elementos podem ser agregados ou desagregados. Não exigem o conhecimento prévio do número de agrupamentos, porém, possuem a desvantagem de não permitir reagrupar dados já atribuídos a um grupo. Os métodos hierárquicos podem ser divididos em dois tipos: aglomerativos ou ascendentes e divisivos ou descendentes.
- Não hierárquicos: não constituem hierarquias e podem ser aplicados a matrizes de dados muito grandes, uma vez que não é preciso calcular e armazenar uma nova matriz de dissimilaridade em cada passo do algoritmo. Também são capazes de realocar os objetos em grupos diferentes. No entanto, nos métodos não hierárquicos é necessário definir o número de grupos à priori, o que pode ser difícil se não há conhecimento da estrutura dos dados.

Os grupos formados pela análise de agrupamentos são fornecidos com base nas medidas de distância calculadas entre os elementos do conjunto de dados, conhecidos

como coeficientes de similaridade ou dissimilaridade. Um dos pré-requisitos para aplicar esta técnica é definir qual o critério a ser utilizado na definição de proximidade entre elementos (AZAMBUJA, 2005).

A semelhança mede o grau de proximidade entre os objetos em estudo, ao passo que a dissemelhança reflete o grau de diferença ou afastamento entre dois objetos. Sendo assim, dois objetos pertencem ao mesmo grupo se são semelhantes e fazem parte de grupos diferentes se são dissemelhantes (QUINTAL, 2006).

Segundo Moita Neto e Moita (1998), a similaridade entre duas amostras pode ser expressa como uma função da distância entre dois pontos representativos destas amostras no espaço n-dimensional. A forma mais comum de calcular a distância entre dois pontos a e b no espaço n-dimensional é conhecida como distância euclidiana (X_{ab}) e é dada por:

$$X^2_{ab} = \sum_{j=1}^n (d_{aj} - d_{bj})^2$$

A forma gráfica usada para representar o resultado final dos diversos agrupamentos é o dendrograma, em que são dispostos linhas ligadas segundo os níveis de similaridade que agruparam pares de espécimes ou de variáveis, conforme mostra a Figura 6. É inevitável que surjam algumas distorções quanto à similaridade no dendrograma, pois, este gráfico é uma simplificação em duas dimensões de uma relação n-dimensional. A medida destas distorções pode ser obtida por um coeficiente de correlação cofenético, como a correlação linear de Pearson, por exemplo, entre os valores da matriz inicial de similaridade e aqueles derivados do dendrograma (LANDIM, 2000).

Figura 6 - Formatos de dendrogramas. Fonte: Landim (2000)

Apesar de auxiliar na avaliação de padrões em uma amostra grande de dados, a análise de agrupamentos possui algumas limitações que de acordo com Nunes (2006), envolvem:

- Não detectar o número de grupos existentes por natureza na amostra;
- Não indicar a melhor solução;
- Nem sempre cria grupos de fácil identificação e iguais dimensões;
- Não considerar as relações existentes entre as variáveis.

Landim (2000) ressalta haver pouco conhecimento a respeito dos pressupostos estatísticos dos vários métodos implicados na análise de agrupamentos e apenas testes limitados são utilizados para verificar a significância dos resultados. Porém, a análise de agrupamentos ainda é bastante eficiente na avaliação introdutória de dados, pois auxilia na formulação de hipóteses a respeito da homogeneidade das informações.

Algumas pesquisas utilizaram a análise de agrupamento como método de avaliação de dados e serviram de referência para o desenvolvimento deste estudo. A seguir, são apresentadas algumas das metodologias consultadas.

Em “Indicadores Ambientais e Gestão Urbana: Desafios para a Construção da Sustentabilidade na Cidade de São Paulo”, desenvolvido pela Prefeitura de São Paulo, a análise de agrupamento foi realizada por meio do programa estatístico *Statistical Package for Social Science* (SPSS) para criar, com base em indicadores sintéticos, conjuntos de distritos que evidenciassem a heterogeneidade de condições e problemas ambientais na metrópole.

Lavarini, Magalhães Júnior e Oliveira (2014) investigaram a possibilidade de agrupar bacias hidrográficas a partir dos fatores de formação dos solos como procedimento-guia no estudo e amostragem de coberturas superficiais. O tratamento estatístico dos dados e a análise de agrupamentos foram realizados no *software* SPSS 20 e, posteriormente, os grupos foram exportados para o ArcGIS® 10 para produzir os mapas necessários aos trabalhos de reconhecimento iniciais em campo.

Rodrigues (2010) aplicou a análise de agrupamentos à um sistema de indicadores urbanos para agregar os setores censitários de São Luís (MA). Inicialmente os dados foram computados no SPSS e depois transferidos para o SIG ArcGIS® versão 9.3 para a confecção dos mapas de agrupamentos. Avaliou-se os grupos com melhores e piores condições por meio da porcentagem apresentada pelos indicadores.

Ainda de acordo com Rodrigues (2010), o cálculo da discrepância entre os agrupamentos contribuiu para revelar as desigualdades intraurbanas e avaliar o quanto uma área da cidade é melhor ou pior que outra. A apresentação final da legenda dos mapas adotou a escala qualitativa de: “ótimo”, “muito bom”, “bom”, “regular”, “ruim” e “péssimo”.

Finalmente, o trabalho desenvolvido por REIS (2014), ao contrário dos demais estudos consultados e à semelhança da metodologia aplicada nesta pesquisa, não utilizou o programa SPSS para manipular os dados. A análise de agrupamentos foi realizada

somente com o uso do SIG ArcGIS® 9.3 para identificar a existência de aglomerações na atividade hoteleira do município de Belo Horizonte e gerar mapas temáticos de agrupamentos dos hotéis.

O trabalho desenvolvido por Mesquita e Roig (2011) também utilizou o ArcGIS® 9.3 para realizar a análise de agrupamentos. O objetivo foi utilizar indicadores socioeconômicos na identificação de possíveis agregações de locais onde existam pessoas sem registro para concentrar políticas de combate a exclusão social.

2.6.2 Matriz de Vulnerabilidade

As matrizes são formadas por duas listagens organizadas em eixos perpendiculares cuja interação é registrada na célula comum a ambos. São ferramentas muito utilizadas nas etapas de diagnóstico e seleção de alternativas (FIDALGO, 2003).

A representação de sistemas por meio de matrizes permite comparar diferentes dados, dois a dois, e determinar se existe alguma conexão entre eles. Por possuírem métodos de manipulação bastante consolidados, as matrizes facilitam a realização de operações matemáticas e transformações com suporte computacional. Além disso, possibilitam visualizar seus elementos e conexões como um todo, principalmente se associadas a um mapa térmico que evidencia esta ligação segundo um critério definido (LEMES, 2012).

Diferentes aspectos podem ser modelados em matrizes. A matriz de riscos, por exemplo, mostra os pontos de cruzamento entre linhas (horizontal) contendo o impacto e colunas (vertical) com a probabilidade de ocorrência. O produto da matriz é a probabilidade ou vulnerabilidade ao impacto, que será mais severa quanto maior o valor dos eixos horizontal (OLIVEIRA; CUNHA, 2015). A Figura 7 mostra um exemplo de matriz de risco.

Figura 7 - Matriz de risco
Fonte: Oliveira e Cunha (2015)

De acordo com Simões (2013), a matriz de risco é um método simples, flexível, prático e intuitivo que tem como principais vantagens:

- Identificar a criticidade de um risco e, consequentemente, a necessidade de recursos;
- Facilitar a discussão acerca de requisitos, tecnologias e riscos;
- Permitir que as partes interessadas se envolvam na avaliação de risco e processo de mitigação inicial, mesmo sem experiência técnica;
- Fácil construção, podendo ser usada mesmo quando dados quantitativos são escassos ou inexistentes.

Entranto Simões (2013) também aponta uma falha da matriz de risco que consiste em uma classificação não meticulosa do índice de risco, ou seja, eventos distintos podem partilhar a mesma categorização de risco, criando um impasse na comparação de diferentes casos.

Alguns autores utilizaram matrizes de indicadores para auxiliar na tomada de decisão. Silva, Martelli e Falk (2014), elaboraram uma matriz de indicadores de probabilidade de riscos direcionada à área da saúde com o intuito de oferecer aos hospitais uma visão sistêmica dos riscos que possibilite priorizar investimentos na melhoria da qualidade da prática assistencial.

Rodrigues e Campanhola (2003) desenvolveram um conjunto de matrizes escalares para valorar indicadores de desempenho ambiental de uma atividade

agropecuária, considerando cinco dimensões: ecologia da paisagem, qualidade dos compartimentos ambientais, valores socioculturais, valores econômicos e gestão e administração.

2.7 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Geoprocessamento é um termo amplo que compreende diversas tecnologias de tratamento e manipulação de dados geográficos por meio de programas computacionais. Dentre essas tecnologias encontram-se os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) ou, na terminologia internacional, *Geographic Information System* (GIS). Os sistemas de informações geográficas são sistemas computacionais, usados para o entendimento dos fatos e fenômenos que ocorrem no espaço geográfico (SANTOS; PINA; CARVALHO, 2000).

O georreferenciamento pode ser entendido como o processo de agregar dados à um mapa por meio da associação com um sistema de coordenadas terrestres qualquer. Normalmente este processo ocorre durante a digitalização, garantindo a possibilidade de combinar mapas distintos. Os sistemas de informação geográfica, por sua vez, foram concebidos para ser um poderoso organizador das informações georreferenciadas (SANTOS; PINA; CARVALHO, 2000).

O SIG pode ser entendido como uma ferramenta de referência sobre locais na superfície da Terra que revela onde uma coisa está ou o que se encontra em uma dada localização. Este instrumento foi desenvolvido para realizar coletas e manipulações de informações geográficas na forma digital, assim como ocorreu com outras tecnologias como, por exemplo, o Sistema de Satélite de Navegação Global (GNSS), a cartografia, geodésia e topografia (FERREIRA, 2006).

De acordo com Câmara et al. (2004), de modo abrangente, um SIG tem os seguintes componentes:

- Interface com usuário;
- Entrada e integração de dados;
- Funções de processamento gráfico e de imagens;
- Visualização e plotagem;

- Armazenamento e recuperação de dados (sob a forma de um banco de dados geográficos).

Ainda segundo Câmara et al. (2004), estes componentes se relacionam de forma hierárquica, conforme pode ser observado na Figura 8. A interface homem-máquina define como o sistema deve ser operado e controlado. No nível intermediário, um SIG deve ter mecanismos que permitam o processamento de dados espaciais, tais como: entrada, edição, análise, visualização e saída. Enquanto isso, internamente ao sistema, um banco de dados geográficos armazena e recupera os dados espaciais. Cada sistema implementa estes componentes de forma distinta e em função de seus objetivos e necessidades, porém, todos os subsistemas citados estão presentes em um SIG.

Figura 8 - Arquitetura dos sistemas de informação geográfica

Fonte: Câmara et al. (2004)

Desde sua concepção inicial, simplista e dirigida ao projeto e construção de mapas, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm incorporado uma crescente variedade de funções. Versões recentes apresentam mecanismos sofisticados para manipular e analisar dados espacialmente, permitindo visualizar os elementos de forma mais evidente do que por meio de relatórios e gráficos convencionais (CRUZ; CAMPOS, 2005).

Segundo Casanova et al. (2005) um SIG diferencia-se dos sistemas de informação convencionais por sua capacidade de armazenar tanto os atributos descritivos como as geometrias dos diferentes tipos de dados geográficos. Por exemplo, para cada lote de um cadastro urbano o SIG guarda, além de dados descritivos como proprietário e valor do Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU), a informação geométrica com as coordenadas dos limites do lote. Sendo assim, podem-se citar como principais características dos SIGs:

- Inserir e integrar, em uma base de dados única, informações espaciais provenientes dos meios físico e bióticos, dados censitários, de cadastros urbanos e rurais, imagens de satélite e dados de *Global Positioning System* (GPS).
- Oferecer ferramentas para combinar as várias informações por meio de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar e visualizar o conteúdo da base de dados geográficos.

De acordo com Celestino e Diniz (1998), um SIG permite armazenar, integrar e gerar novas informações por meio do processamento gráfico de informações espaciais como mapas, imagens de satélites e informações alfanuméricas de bancos de dados. Uma característica básica de um SIG é tratar relações espaciais entre objetos geográficos e, para isso, consideram-se as relações entre as classes de cada tema (relações topológicas) no processo de integração.

Moraes, Torres e Kiperstok (2008) citam como pontos positivos do uso do SIG:

- O armazenamento de informações georreferenciadas;
- A possibilidade de aplicação de filtros, facilitando a identificação e classificação de dados;
- Permitir operações de cálculo entre as variáveis e espacialização dos resultados;
- Identificar pontos críticos;
- Criar infinitos cenários de análise;
- Os dados armazenados formam arquivos com extensão dbf que podem ser utilizados em programas de planilhas eletrônicas;
- Produzir mapas, gráficos e tabelas, possuindo o recurso tridimensional e a criação de cenários foto-realísticos.

No que se refere ao uso de SIGs como ferramenta para analisar um sistema de indicadores, pode-se afirmar que este tipo de informação tratada com técnicas de geoprocessamento possibilita a representação e modelagem do conhecimento, constituindo um importante Sistema de Apoio à Decisão Espacial (SADE). Os recursos de gerenciamento, visualização e análise da informação de um SIG permitem ao gestor agregar um grande volume de dados espaciais e não espaciais em um único ambiente, evidenciando a necessidade de se dispor de ferramentas integradoras que facilitem a tomada de decisão e possibilitem um melhor planejamento de ações (BATISTA, 2005).

Ademais, os indicadores ambientais georreferenciados contribuem para gerar informações espacializadas que expressam de forma sucinta as condições físico-ambientais dos ecossistemas em diversos níveis. Por meio deste instrumento, os indicadores ambientais deverão permitir a análise de situações complexas através de índices simplificados, quantificáveis e de fácil comunicação. O geoprocessamento de indicadores ambientais é uma ferramenta bastante útil no apoio à decisão em programas de desenvolvimento regional e na orientação de políticas públicas, pois, permite obter números quantitativos e qualitativos sobre os problemas e espacializá-los, possibilitando melhor alocação dos recursos para a recuperação ambiental de áreas degradadas (BESSA JUNIOR; MÜLLER, 2000).

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange as 10 bacias hidrográficas do município de São Carlos: Gabirobas, Mogi – Guaçu, Araras, Cabaceiras, Quilombo, Chibarro, Monjolinho, Pântano, Feijão e Jacaré – Guaçu.

De acordo com a divisão efetuada pela Lei Estadual nº 7.633/91 para o Estado de São Paulo, o território do município está situado em duas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI), Tietê – Jacaré (denominada no estado de São Paulo de UGRHI 13) e Mogi – Guaçu (denominada UGRHI 9). Toda a área urbana, exceto o condomínio Samambaia, os distritos de Água Vermelha e Santa Eudóxia, está situada na bacia do Tietê – Jacaré correspondente a UGRHI 13 (MONTAÑO, 2002).

Por ter sua área localizada em duas UGRHIs, o município é separado em dois grupos de macro bacias, a Mogi-Guaçu e a Tietê-Jacaré. O primeiro grupo possui sete sub-bacias, sendo elas: Araras, Mogi-Guaçu, Gabirobas, Cabaceiras, Chibarro, Quilombo e Pântano. O segundo grupo contém três, denominadas de Monjolinho, Feijão e Jacaré-Guaçu, situadas ao sul do município (DENÚBILA, 2013).

A Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Mogi – Guaçu localiza-se na região nordeste do Estado de São Paulo e sudoeste de Minas Gerais, distante aproximadamente 200 km da cidade de São Paulo, ocupando uma área de 14.653 km². O rio Mogi – Guaçu nasce no município de Bom Repouso em Minas Gerais (SÃO PAULO, 1999). Já a bacia do Tietê-Jacaré, localizada na região central do Estado de São Paulo, é composta por 34 municípios e abriga cerca de 3% da população do Estado de São Paulo, dos quais 96% vivem em áreas urbanas (SÃO PAULO, 2009).

A UGRHI 13 é classificada como em industrialização, com enfoque para a agroindústria. Na UGRHI 9 predominam as atividades do setor primário, tendo como principais culturas a cana-de-açúcar, laranja, pastagem (braquiária) e milho. No setor secundário, predomina a agroindústria, como usinas de açúcar e álcool, óleos vegetais e bebidas, além de frigoríficos e indústria de papel e celulose. O turismo é também uma atividade importante, com a presença das estâncias hidrominerais de Águas da Prata, Águas de Lindóia, Lindóia, Serra Negra e Socorro (BRASIL, 2011).

A Figura 9 mostra o mapa com a localização no município de São Carlos das 10 bacias analisadas.

Figura 9 - Bacias hidrográficas de São Carlos – SP
Fonte: Denúbila (2013)

De acordo com o Plano Municipal de Saneamento de São Carlos (PMSSanCa) (SÃO CARLOS, 2012), na época em que foi realizado o diagnóstico para a elaboração do Plano Diretor de São Carlos, as principais bacias do município eram:

- Bacia do Monjolinho: recebe todo o esgoto da cidade e também é um importante manancial de abastecimento (captação do Espraiado);
- Bacia do Feijão: está situada na Área de Proteção Ambiental (APA) Corumbataí e contribui para o abastecimento de água de São Carlos. Trata-se de área de recarga do Aquífero Guarani;
- Bacia do Quilombo: constitui um eixo de comunicação histórico onde se estabeleceram grandes propriedades do ciclo cafeeiro. O Vale do Quilombo é considerado o grande vetor de potencial turístico histórico-ecológico no município.

Devido à localização elevada no Estado, a área do município está sobre o divisor de água que limita as bacias hidrográficas do Rio Mogi-Guaçu e Tietê, por isso, a maioria dos cursos d'água que drenam São Carlos e a totalidade dos que drenam o perímetro urbano têm nascentes no município. A poluição dos cursos d'água está associada principalmente aos efluentes de esgoto urbano e uso inadequado dos recursos hídricos e do solo. Alguns dos córregos mais importantes que drenam a cidade são: Monjolinho, Mineirinho, Gregório, Tijuco, Medeiros, Lazarini, Água Quente e Água Fria, compondo a bacia do Ribeirão Monjolinho (OLIVEIRA, 1996).

São Carlos situa-se sobre áreas de recarga de mananciais superficiais rasos e profundos, existindo três aquíferos na região: Botucatu/Pirambóia, Itaqueri e Serra Geral. O aquífero Botucatu representa um imenso manancial de água sub-superficial que pertence à Bacia Sedimentar do Paraná. O Estado de São Paulo possui grande dependência das águas subterrâneas provenientes desse aquífero. As áreas de mananciais de São Carlos são responsáveis pela metade da água utilizada para abastecimento público da cidade, sendo que 51,8% provêm da captação superficial e 48,2% do abastecimento subterrâneo (SÃO CARLOS, 2014).

A fim de preservar e conservar o abastecimento de água com qualidade, a Prefeitura de São Carlos aprovou em 12 de dezembro de 2006 a Lei nº 13.944 que, dentre outras providências, dispõe sobre a criação das Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais (APREM) do município. A APREM de São Carlos, sem prejuízo da inclusão de novas áreas de interesse para abastecimento público, corresponde à: bacia hidrográfica do Córrego Monjolinho a montante da Estação de captação de água do Espraiado e a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Feijão, dentro do município e a montante da Estação de

Captação de Água para abastecimento público de São Carlos (BRASIL, 2006).

3.1 Características gerais

O município de São Carlos está localizado na região central do Estado de São Paulo entre as coordenadas 47°30' e 48°30' Longitude Oeste e 21°30' e 22°30' Latitude Sul, ocupando uma área de 1.140, 90 km² (OLIVEIRA, 1996).

Faz limite com os seguintes municípios: ao Norte, Rincão, Luís Antônio e Santa Lúcia; ao Sul, Ribeirão Bonito, Brotas e Itirapina; a Oeste, Ibaté, Araraquara e Américo Brasiliense e a Leste, Descalvado e Analândia (VELOZO, 2006).

A população estimada do município em 2013 era de 236.457 habitantes, distribuídos em uma área de 1.137,332 Km². A economia é bastante diversificada, com destaque para indústrias de bens de consumo, de alta tecnologia, metal-mecânica, de transformação de plásticos, têxtil, de motores e compressores, bem como a produção de leites e derivados, cana-de-açúcar e laranja (OLIVEIRA; MONTAÑO, 2010).

São Carlos possui uma grande demanda à urbanização em função das suas características econômicas. Atualmente, é conhecida como “Cidade Tecnológica” por ser um dos principais pólos de alta tecnologia no Brasil com inúmeras indústrias de tecnologia e logística, além de três universidades, UNICEP, USP e UFSCar, caracterizando-a também como um grande centro educacional do interior de São Paulo. O desenvolvimento da cidade iniciou-se com a antiga rota de tropeiros, que tinha início na cidade de Piracicaba e seguia até Goiás, sendo fundada oficialmente em 4 de novembro de 1857 com a inauguração da Capela da Matriz. A dinâmica da urbanização de São Carlos, nessa época, foi determinada pelo predomínio da economia cafeeira (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS, 2015).

O clima da região é classificado pelo sistema de Köppen como do tipo Cwa, mesotérmico úmido subtropical de inverno seco, em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18° C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C. Há uma nítida distinção entre a estação seca (maio a setembro), com conseqüente deficiência hídrica e, a chuvosa (outubro a abril) (LORANDI et al., 2001).

Quanto à vegetação, as pastagens ocupam a maior parte das terras que cercam o núcleo urbano, exceto no lado leste em direção a Ibaté, onde encontram-se plantações de cana-de-açúcar. A leste do perímetro urbano existem áreas de reflorestamento com *Pinus*. A vegetação original do município é o cerrado, que varia de campo cerrado até cerradão.

Entretanto, a vegetação tem sido alterada por atividade de reflorestamento, loteamentos e mineração, reduzindo-a a alguns fragmentos florestais, principalmente no entorno do bairro Cidade Aracy, pois, a textura arenosa do solo compromete o uso agrícola (OLIVEIRA, 1996).

Segundo Soares, Silva e Lima (2003), o município era ocupado no passado por 27% de cerrado (cerrado *sensu stricto*, campo sujo e brejos), 16% de cerradão, 55% de floresta semidecídua e mata ripária e 2% de floresta semidecídua com *A. angustifolia*. Atualmente há 2% de cerrado, 2,5% de cerradão, 1% de floresta semidecídua e ripária e 1,5% de capoeiras.

Algumas espécies arbóreas comuns da região são: *Stryphnodendrum barbatiman* (barbatimão), *Paratecoma peroba* (pequi), *Tabebuia ipe* (ipê-amarelo), *Anacardium nanum* (cajeiro do campo), *Pterodon pubescens* (faveiro), *Xylopia aromatica* (pindaiva brava), *Miconia rubiginosa* (queresmeira do campo), *Ocotea pulchella* (canela de folha dura), *Siparuna guianensis* (cafezinho fedido), *Vochysia tucanorum* (pau de tucano), *Virola surinamensis* e *Qualea grandiflora*. A árvore nativa e símbolo de São Carlos que nomeou o município de São Carlos do Pinhal no passado, o pinheiro-do-paraná (*Araucaria angustifolia*), é encontrado com pouca frequência na área urbanizada e entorno. Apesar da latitude relativamente baixa e atípica para a ocorrência da espécie, a presença da *Araucaria angustifolia* na região relaciona-se com as altas cotas altimétricas que proporcionam um clima semelhante ao das formações de Mata de Araucárias (OLIVEIRA, 1996).

No município de São Carlos existem algumas reservas ambientais, dentre as quais estão a Área de Proteção Ambiental (APA) Corumbataí e as Estações Ecológicas do Jataí e São Carlos, além de áreas de reserva legal. Cada um destes tipos de reserva possui características e atribuições distintas, conforme exposto a seguir:

- Reserva Legal (RL) é uma área localizada no interior de uma propriedade ou posse rural cujos recursos são passíveis de uso sob o regime de manejo florestal sustentável, permitindo a produção de mel e extração seletiva de madeira, frutos e óleos. No Estado de São Paulo devem ser destinados no mínimo 20% do total da propriedade à reserva legal, no qual podem ser incluídas as áreas não adequadas para agricultura. Entretanto, caso não tenha toda a área dentro da propriedade, pode-se compensar em outra que tenha uma mancha de mata, por exemplo (SÃO PAULO, 2011).

- Unidade de conservação (UC), no Brasil, são áreas instituídas pelo Poder Público para proteger a fauna, flora, microorganismos, corpos d'água, solo, clima, paisagens e todos os processos ecológicos pertinentes aos ecossistemas naturais. Existem diversas categorias de unidades de conservação e, algumas delas, também protegem o patrimônio histórico-cultural, as práticas e o modo de vida das populações tradicionais (OLIVATO; GALLO JUNIOR, 2008).
- Unidades de Conservação de Proteção Integral são áreas onde não é admitido consumo, coleta, dano ou destruição dos recursos naturais. Além disso, a interferência humana deve ser evitada para não alterar o ecossistema destas áreas. A Estação Ecológica é um exemplo de unidade de proteção integral, de posse e domínio públicos, que tem como objetivo a preservação da natureza e a realização de pesquisas científicas. Com o intuito de manter o ecossistema protegido, é proibida a visitação pública nas Estações Ecológicas, exceto quando com o objetivo educacional, e os estudos científicos (apesar de ser um dos objetivos dessa categoria de UC) depende de autorização prévia do órgão responsável pela manutenção da unidade (GARBELINI, 2011).
- As Áreas de Proteção Ambiental, de acordo com a Lei 9.985 de 18 de julho de 2000, que dentre outras deliberações institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza, a APA é em geral extensa, pode ser constituída de terras públicas ou privadas, possui certo grau de ocupação humana e é dotada de atributos abióticos, bióticos, estéticos ou culturais importantes para a qualidade de vida e o bem-estar dos seres vivos. O objetivo dessa área é proteger a diversidade biológica, regular o processo de ocupação e assegurar o uso sustentável dos recursos naturais (BRASIL, 2000).

Até a década de 50, a região da EEJ era conhecida como Fazenda Jataí e pertencia à antiga Companhia Mogiana de Estradas de Ferro. Durante este período, parte da cobertura vegetal original foi explorada pela Companhia na obtenção de combustível lenhoso, mourões de cercas e dormentes para construção da estrada de ferro e, também, pela população local na construção civil, confecção de móveis e barco, alimentação e para fins medicinais (OBARA, 1999).

O Decreto Lei nº 18.997 de 15 de junho de 1982 estabeleceu a Estação Ecológica do Jataí em uma área de 4.532,18 hectares situada em terras de domínio da Fazenda Pública de Estado, no município de Luiz Antônio, que antes pertenciam à Estação

Experimental de Luiz Antônio (EELA). A finalidade da EEJ é assegurar a integridade dos ecossistemas, conjunto lagunar, da flora e fauna local, bem como sua utilização para objetivos educacionais e científicos (BRASIL, 1982).

Já a APA Corumbataí foi criada pelo Decreto Estadual nº 20.960 de 8 de junho de 1983³ e localiza-se no Centro-Leste do Estado de São Paulo. Esta reserva protege as Cuestas Basálticas, morros testemunhos, recursos hídricos superficiais, o Aquífero Guarani e atributos ambientais e paisagísticos da área, por conterem fonte significativa de água potável, remanescentes de vegetação nativa e patrimônio arqueológico. Os municípios que compõem a APA são: São Carlos, Analândia, Brotas, Itirapina, Corumbataí, Ipeúna, Rio Claro, Dois Córregos, Torrinha, Mineiros do Tietê, Barra Bonita, Santa Maria da Serra, São Pedro, Charqueada e São Manuel (Ilha do Cerrito) (CORVALÁN, 2009).

Finalmente, a Estação Ecológica de São Carlos (EESCAR) foi criada com o Decreto nº 26.890, de 12 de Março de 1987, por possuir os últimos remanescentes florestais do Estado e abrigar espécies de flora e fauna ameaçadas de extinção, cuja proteção é dever do Estado (BRASIL, 1987).

A Estação Ecológica de São Carlos está localizada na região centro-leste do Estado de São Paulo, no município de Brotas, entre as coordenadas geográficas 22°05' e 22°07' de latitude sul e 48°00' e 48°05' longitude oeste. É uma das poucas Unidades de Conservação (UC) com situação fundiária regularizada e sem moradores em suas delimitações. Os 75,26 hectares da Estação Ecológica de São Carlos são administrados pelo Instituto Florestal da Secretaria de Estado do Meio Ambiente de São Paulo, e receberam este nome em decorrência do decreto de desapropriação da área constar que a mesma está situada no município e comarca de São Carlos. No entanto, as informações geográficas demonstram que a EESCAR está localizada no município de Brotas (SANTOS et al., 2003). Apenas parte da Estação Ecológica de São Carlos pertence ao município de São Carlos, mais precisamente à bacia do Jacaré – Guaçu.

Em relação à geologia regional, o município de São Carlos está situado no complexo geológico da Bacia Sedimentar do Paraná, que abrange boa parte dos Estados de São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais. Dentre as litologias desta bacia intracratônica, são encontradas no município a Formação

³ BRASIL. Decreto Estadual nº 20.960, de 8 de junho de 1983. Declara área de proteção ambiental a regiões situadas em diversos municípios, dentre os quais Corumbataí, Botucatu e Tejuapá. **Diário Oficial [do] Estado de São Paulo**, Poder Executivo, São Paulo, SP, 9 jun.1983, v. 93, n. 107, 1983.

Corumbataí, Formação Pirambóia, Botucatu, Serra Geral, Grupo Bauru e Sedimentos Cenozóicos (MURO, 2000).

A Bacia do Paraná ocupa uma área de 1.400.000 km² e estende-se pelo Brasil (1.100.000 km²), metade oriental do Paraguai (100.000 km²), metade ocidental do Uruguai (100.000 km²) e região ocidental da Argentina (100.000 km²), onde é conhecida como Bacia Chaco-Paraná. No Brasil, corresponde a Província Sedimentar Meridional bordejada principalmente pelas Províncias Tocantins e Mantiqueira (BARTOLOMEU, 2012).

No município predominam aspectos de relevo denudacionais formados basicamente por colinas de topos convexos e tabulares, altimetrias entre 600 - 900 metros e vertentes com declividade que varia de 2 a 20%, sendo superior a 30% nos setores mais dissecados do relevo. A litologia dominante é composta por depósitos arenosos e argilosos. Quanto aos solos, a maior parte da região é constituída pelos tipos Latossolo vermelho-escuro e Neossolos Quartzarênicos (MILANI; PEREZ FILHO, 2003).

4. MÉTODO E ETAPAS DA PESQUISA

O desenvolvimento da presente pesquisa se apoiou na utilização da bacia hidrográfica como unidade básica de análise ambiental e no emprego de indicadores ambientais estruturados no modelo Pressão – Estado – Resposta (PER). O Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGIS® 10 foi utilizado como ferramenta computacional principal para o desenvolvimento das principais etapas do trabalho.

Nesta linha de investigação serviram como referencial teórico os seguintes trabalhos:

- GEO cidade de São Paulo (2004) desenvolvido pela Secretaria Municipal do Verde e Meio Ambiente (SVMA) da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT);
- Indicadores Ambientais e Gestão Urbana: desafios para a construção da Sustentabilidade na Cidade de São Paulo (2008) desenvolvido pela Secretaria Municipal do Verde e Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de São Paulo e o Centro de Estudos da Metrópole (CEM);
- Proposta de um sistema de indicadores de desenvolvimento sustentável para bacias hidrográficas (GUIMARÃES, 2008);
- Alterações ambientais associadas à mineração no município de São Carlos (SP), utilizando AHP e SIG (DENÚBILA, 2013);
- Indicadores de sustentabilidade para análise comparativa de bacias hidrográficas (PAULA JUNIOR; POMPERMAYER, 2007);
- Avaliação da sustentabilidade ambiental em bacias hidrográficas mediante a aplicação do modelo P-E-R (KEMERICH, 2013);
- Sistema de indicadores de sustentabilidade para gestão e planejamento de recursos hídricos de bacias hidrográficas: o caso da bacia hidrográfica do rio Almada – BA (COSTA, 2013).
- Análise da fragmentação da paisagem da bacia hidrográfica do Alto São Bartolomeu como subsídio ao modelo Pressão – Estado – Resposta (OLIVEIRA et al., 2014).

Por se tratar de um ensaio metodológico foram utilizados dados de natureza

essencialmente secundária, obtidos por meio da base cartográfica digital e os mapas temáticos desenvolvidos por Denúbila (2013) de uso e ocupação, reservas ambientais e suscetibilidade à erosão das bacias do município de São Carlos.

Com base nesses princípios gerais, esta pesquisa envolveu as seguintes etapas e atividades esquematizadas na Figura 10.

Figura 10 - Principais etapas e atividades da pesquisa

4.1 Planejamento

Esta etapa envolveu a definição da área de estudo, tema, objetivos, método e instrumentos de pesquisa. Posteriormente, procedeu-se a seleção dos indicadores de pressão, estado e resposta.

As bacias hidrográficas do município de São Carlos – SP foram definidas como

área de estudo por serem unidades naturais que revelam as interações entre os componentes dos meios físico, biótico e socioeconômico.

A temática escolhida foi a utilização de indicadores ambientais, sistematizados no modelo PER, com o intuito de realizar o diagnóstico do potencial de degradação por erosão nas bacias hidrográficas de São Carlos.

O modelo Pressão – Estado – Resposta (PER) é um dos métodos mais utilizado para apresentar estatísticas e indicadores ambientais, pois revela as interações e relações de causa-efeito existentes entre a ação humana e os componentes da natureza. Este modelo foi escolhido para auxiliar na seleção dos indicadores, organização e interpretação da informação.

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) foi utilizado como instrumento para ponderar os indicadores e executar os procedimentos para agregá-los perante os métodos matriz de vulnerabilidade e análise de agrupamentos.

A escolha dos indicadores baseou-se nos critérios de seletividade (relevância e grau de significância) e viabilidade (disponibilidade de informações e custos). Os indicadores definidos são apresentados no Quadro 6:

Quadro 6 - Indicadores de pressão, estado e resposta selecionados

INDICADOR	POSIÇÃO EM RELAÇÃO AO MODELO PER	MEIO A QUAL PERTENCE
Uso e ocupação	Pressão	Socioeconômico
Suscetibilidade à erosão	Estado	Físico
Reservas ambientais	Resposta	Biótico

4.2 Levantamento de dados

Nesta etapa foi realizada a revisão bibliográfica mediante pesquisas no *Dedalus*, banco de dados bibliográficos da Universidade de São Paulo (USP), utilizando as palavras-chaves: indicadores, indicadores ambientais, modelo Pressão – Estado – Resposta, bacia hidrográfica, São Carlos, análise de agrupamentos, matriz de vulnerabilidade e análise espacial em SIG. Posteriormente, outras plataformas de

pesquisa acadêmica foram consultadas, dentre as quais: *Google Scholar*, *SciELO*, *ScienceDirect* e *ResearchGate*.

Também ocorreu a coleta de dados secundários para compor o sistema de indicadores por meio de pesquisas nas seguintes divisões administrativas da Prefeitura de São Carlos: Secretaria Municipal de Desenvolvimento Sustentável, Ciência e Tecnologia; Defesa Civil; Secretaria Municipal de Obras Públicas; Vigilância Sanitária; Secretaria de Saúde; Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE); Secretaria de Habitação e Desenvolvimento Urbano e, por fim, Vigilância Epidemiológica.

Além disso, consultaram-se trabalhos acadêmicos e documentos dos Comitês de Bacias do Tietê-Jacaré e do Mogi-Guaçu, da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A base de dados obtida nesta etapa é oriunda de Denúbila (2013) e consiste em:

- Base cartográfica digital na escala 1: 50.000 e apresentada na escala 1: 250.000;
- Mapas temáticos: uso e ocupação, suscetibilidade à erosão e reservas ambientais.

4.3 Aplicação do modelo Pressão-Estado-Resposta (PER)

Esta fase foi dividida em etapas nas quais os dados secundários obtidos foram manipulados e organizados no modelo PER para ajudar na interpretação dos resultados. Posteriormente, utilizaram-se os métodos análise de agrupamentos e matriz de vulnerabilidade para produzir resultados que permitissem a comparação entre as bacias. Os procedimentos de cada etapa são apresentados a seguir.

4.3.1 Estruturação dos indicadores

Etapa que envolveu a quantificação dos indicadores em porcentagem de áreas adotando os seguintes critérios:

- Indicador de pressão: cálculo da porcentagem de área das bacias ocupada por loteamento, área urbana e periurbana, mineração e instalações da TAM linhas aéreas, pois são mais vulneráveis à erosão;

- Indicador de estado: determinação da porcentagem de áreas com alta e muito alta suscetibilidade à erosão para definir o potencial erosivo nas bacias a partir das áreas mais vulneráveis;
- Indicador de resposta: contagem da porcentagem de áreas de reservas ambientais.

Os procedimentos executados no Sistema de Informação Geográfica (SIG) para quantificar os indicadores foram:

1. Criação de campos numéricos na tabela de atributos do plano de informação vetorial das bacias hidrográficas para armazenarem os valores de área total, área do indicador e porcentagem de área do indicador (comando *add field* – numérico e real).
2. Cálculo das áreas totais das bacias (*Calculate geometry*: área no campo área total) e cálculo das áreas dos indicadores (*Tabulate area*: considerando cada um dos indicadores).
3. Passagem dos valores de área dos indicadores por bacia para os respectivos campos de áreas (*Join* tabela de atributos das bacias com as tabelas de cálculo das áreas e cópia desses valores para o campo área dos indicadores).
4. Cálculo das porcentagens de área dos indicadores nos respectivos campos numéricos (comando *field calculator*).

Após a quantificação foram produzidos mapas dos indicadores de pressão, estado e resposta. O método *natural breaks* foi aplicado nas porcentagens calculadas para agrupar as bacias em 5 classes (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto). O objetivo destes mapas foi facilitar a identificação dos níveis de ocupação, suscetibilidade à erosão e reservas ambientais das bacias.

O método *natural breaks*, também denominado distribuição de Jenks ou quebra natural, efetua a distinção de classe a partir da grande diferença entre dois valores, formando grupos com medidas semelhantes. O número de classes foi definido de modo que não fosse demasiadamente pequeno e resumido a ponto de perder muita informação, e nem grande o suficiente para prejudicar a interpretação dos dados.

Nesta etapa também foram produzidas as fichas técnicas de cada indicador, adaptadas de Vieira (2009), com o intuito de organizar as informações pertinentes e documentar o processo para construí-los, permitindo revisões futuras.

4.3.2 Integração dos indicadores

Duas técnicas foram utilizadas para agregar os indicadores e, assim, avaliar o potencial de degradação por erosão das bacias: análise de agrupamentos e matriz de vulnerabilidade.

A escolhida análise de agrupamentos baseou-se na aplicação bem-sucedida desta metodologia nos estudos consultados:

- Indicadores Ambientais e Gestão Urbana: desafios para a construção da Sustentabilidade na Cidade de São Paulo (2008) desenvolvido pela Secretaria Municipal do Verde e Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de São Paulo e o Centro de Estudos da Metrópole (CEM);
- Sistema de indicadores e desigualdade socioambiental intraurbana de São Luís – MA (RODRIGUES, 2010);
- Análise de metodologias para identificação de *cluster* de acesso a documentação civil básica (MESQUITA; ROIG, 2011).

Durante a revisão bibliográfica não foram encontrados estudos utilizando a matriz de vulnerabilidade para ponderar indicadores. Apesar disso, este método foi utilizado nesta pesquisa como ensaio metodológico.

4.3.2.1 Análise de agrupamentos

A análise de agrupamentos foi realizada por meio das ferramentas do *ArcToolbox*. Os comandos utilizados para produzir o mapa de agrupamentos foram: *Spatial Statistics Tools>Mapping Cluster>Cluster and Outlier Analysis*.

Os dados de entrada consistiram nos valores dos indicadores e a medida escolhida para agrupar as bacias com características similares foi a Distância Euclidiana. Quanto maior seu valor, mais semelhantes serão os elementos do grupo.

4.3.2.2 Matriz de vulnerabilidade

Todos os procedimentos detalhados nesta seção foram executados com o uso de SIG. Inicialmente foi feita a conversão dos polígonos dos indicadores de pressão, estado e resposta em matrizes (arquivos *raster*) compostas pelas seguintes classes obtidas segundo o critério *natural break*: muito baixa (MB), baixa (B), média (M), alta (A) e muita alta (MA).

Foram atribuídos valores a estas classes em que, considerando os indicadores de pressão e estado, o número 1 corresponde à situação de vulnerabilidade ambiental menos preocupante dentre todas, enquanto o número 5 representa o cenário mais crítico. Sendo assim, o valor 1 é atribuído às bacias que apresentam poucas áreas de alta e muito alta suscetibilidade à erosão e poucas áreas ocupadas por loteamento, área urbana e periurbana, mineração e instalações da TAM linhas aéreas (Taxi Aéreo Marília). Os valores das classes para estes dois indicadores são: muito baixa = 1, baixa = 2, média = 3, alta = 4 e muito alta = 5.

Entretanto, no caso do indicador de resposta há uma inversão desta lógica, pois a melhor condição ambiental é caracterizada pela existência de alta porcentagem de reservas. Assim sendo, o número 1 representa a existência de muitas áreas de reservas ambientais e o 5 equivale à presença de poucas reservas nas bacias. Os valores das classes nas quais as bacias foram categorizadas a partir do indicador de resposta são: muito baixa (MB) = 5, baixa (B) = 4, média (M) = 3, alta (A) = 2 e muita alta (MA) = 1.

Duas matrizes inteiras foram construídas nas quais as linhas e as colunas correspondem aos indicadores comparados dois a dois multiplicando-se cada linha pela respectiva coluna, conforme exemplifica a Figura 11. Na primeira foram multiplicados os indicadores de pressão e estado para obter o índice denominado P x E de cada bacia do município de São Carlos. Em seguida, os valores do índice P x E foram integrados ao indicador de resposta na segunda matriz para produzir o índice designado P x E x R. O resultado final foi dividido, pelo critério *natural breaks*, em 5 classes (muito baixa, baixa, média, alta e muita alta) que denotam o potencial de degradação por erosão das bacias.

		INDICADOR DE ESTADO				
		MB (1) ¹	B (2) ²	M (3) ³	A (4) ⁴	MA (5) ⁵
INDICADOR DE PRESSÃO	MB (1)	MB (1)	MB (2)	MB (3)	B (4)	B (5)
	B (2)	MB (2)	B (4)	B (6)	M (8)	M (10)
	M (3)	MB (3)	B (6)	M (9)	M (12)	A (15)
	A (4)	B (4)	M (8)	M (12)	A (16)	MA (20)
	MA (5)	B (5)	M (10)	A (15)	MA (20)	MA (25)

Figura 11 - Matriz Pressão x Estado

(1) MB = muito baixa; (2) B = baixa; (3) M = média; (4) A = alta; (5) MA = muita alta

Uma escala de cores semafóricas foi utilizada nas matrizes para distinguir as classes, em que o verde escuro representa o menor potencial erosivo enquanto o vermelho demonstra a pior situação, isto é, potencial mais alto, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Escala de cores utilizadas para ressaltar as classes de potencial de degradação por erosão

Por fim, foi produzido o mapa com o agrupamento das bacias segundo a matriz de vulnerabilidade para facilitar a visualização e discussão dos resultados.

Os comandos utilizados para realizar estes procedimentos no SIG foram:

1. *Conversions tools/ to raster/ polygon to raster*: conversão dos mapas dos

indicadores para matriz.

2. *Spatial analyst tools/ math/ times*: multiplicar.
3. *Spatial analyst tools/reclass/reclassify*: classificar pelo *natural breaks*.
4. *Properties/ Simbology*: criar escala e gerar mapa.

4.4 Discussão dos resultados e conclusão

Nesta etapa compararam-se os grupos de bacias formados pela matriz de vulnerabilidade e análise de agrupamentos para verificar diferenças e semelhanças entre os resultados obtidos por estes métodos. Também foram identificados os fatores que corroboraram para os potenciais de degradação por erosão constatados nas bacias.

Enfim redigiu-se uma conclusão para expor se os objetivos do estudo foram atingidos e os resultados satisfatórios, além de ressaltar a relevância da pesquisa para a problemática avaliada e propor idéias para pesquisas futuras.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Base de dados espacial

A base cartográfica digital utilizada neste estudo foi apresentada na escala 1:250.000 e deriva de Denúbila (2013) que a elaborou na escala de 1:50.000 por meio dos procedimentos apresentados de forma sintética a seguir.

O SIG ArcGIS®/Arcmap versão 10 foi utilizado para construir a base georreferenciada. Os documentos utilizados para delimitar as bacias e o município e definir a rede de drenagem foram as cartas topográficas do IBGE na escala 1:50.000 referentes as folhas: Porto Pulador (SF23-VC-IV-1), Luís Antônio (SF23-V-C-IV-2), Ibaté (SF23-V-C-IV-3), Descalvado (SF23-V-C-IV-4), São Carlos (SF23-Y-A-I-1), Corumbataí (SF23-Y-A-I-2) e Riberão Bonito (SF22-Z-BIII-2). Agruparam-se estas folhas para criar um mosaico em coordenadas geográficas, realizando um controle do erro admissível. Posteriormente, o mosaico foi projetado para coordenadas no Sistema de Projeção UTM (Universo Transverso de Mercator), Datum Córrego Alegre e fuso 23S;

O modelo digital do terreno (MDT) no formato *grid* foi gerado com a ferramenta *Topo To Raster*. Os dados de entrada consistiram nas curvas de nível (com equidistância de 20 metros), pontos cotados e o sentido da rede de drenagem. O tamanho da malha (*grid*) utilizada na interpolação foi de 10 metros, inferior ao de 25 metros, recomendados como erro cartográfico admissível para a escala adotada. Este método de interpolação foi estruturado especificamente para criar o modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC). Efetuou-se a suavização do relevo do MDT com a ferramenta *filter* e, em seguida, o modelo foi validado mediante duas metodologias, uma qualitativa e outra quantitativa.

Estes dados elaborados por Denúbila (2013) foram manipulados a fim de quantificar os indicadores selecionados e produzir mapas e tabelas, apresentados adiante, para auxiliar na análise e interpretação dos resultados.

A Tabela 1 mostra as áreas das 10 bacias estudadas em hectare (ha) e em percentagens da área total do município de São Carlos (SP). Observa-se que as bacias Quilombo, Monjolinho e Araras são as mais representativas em termos de áreas, perfazendo cerca de 63% da área total do município. A bacia do Pântano possui a menor área, representando apenas 1,6% da área total do município.

Tabela 1 – Área das bacias hidrográficas analisadas

Bacias Hidrográficas	Áreas	
	(ha)	(% do Total)
Feijão	12423,4	11
Chibarro	3426,1	3
Araras	20098,4	17,8
Cabaceiras	6608,3	5,8
Gabiobas	5602,2	5
Jacaré-Guaçu	7818,5	6,9
Monjolinho	20915,6	18,5
Pântano	1678,0	1,6
Quilombo	29734,6	26,3
Mogi-Guaçu	4674,2	4,1

A Figura 13 apresenta o mapa de elevação do terreno com valores em metros, obtidos a partir da reclassificação do MDT produzido por Denúbila (2013) em cinco classes de cotas: 503 a 600; 601 a 700; 701 a 800; 801 a 900 e 901 a 1008.

Figura 13 - Mapa de elevação dos terrenos das bacias hidrográficas analisadas

A Tabela 2 apresenta a distribuição percentual em área destas classes de elevação do terreno nas 10 bacias hidrográficas do município de São Carlos. A bacia do Pântano ocupa os terrenos mais elevados do município com 95% da sua área total apresentando cotas acima de 800 m. As bacias das Gabirobas e Mogi-Guaçu estão situadas nos terrenos mais baixos, possuindo 100% de suas áreas com cotas inferiores a 700 m. As bacias do Monjolinho e do Quilombo apresentam terrenos distribuídos nas cinco classes de elevação, abrangendo cotas entre 503 a 1008 m.

Tabela 2 - Percentuais de área das bacias distribuídos nas diferentes classes de elevação do terreno					
Bacias Hidrográficas	Áreas Percentuais das Classes de Elevação (m)				
	503 a 600	601 a 700	701 a 800	801 a 900	901 a 1008
Feijão	0	0,6	46,7	34,7	18
Chibarro	0	3,2	71,5	25,3	0
Araras	25	47,6	24,3	3,1	0
Cabaceiras	16,9	55,3	26,7	1,1	0
Gabirobas	70	30	0	0	0
Jacaré-Guaçu	1,7	43,9	30,6	23,8	0
Monjolinho	5	13,1	26,2	52,2	3,5
Pântano	0	0	4,9	60,4	34,7
Quilombo	5,3	14,5	43,1	26,8	10,3
Mogi-Guaçu	52,5	47,5	0	0	0

As Tabelas 3 e 4 apresentam, respectivamente, a distribuição percentual em área das classes de declividade e dos tipos de solos os quais constituem importantes condicionantes naturais que afetam a suscetibilidade à erosão pluvial dos terrenos. Os valores das classes de declividade foram definidos com base no grau de limitação de uso da terra e as formações pedológicas foram agrupadas conforme a textura predominante (arenosa, areno-argilosa e argilosa), pois é a característica mais atuante na definição da suscetibilidade à erosão pluvial dos solos.

Nos solos definidos como de textura fina as curvas granulométricas apresentam o predomínio das frações silte e argila, enquanto nos caracterizados como granulares prevalecem as porções arenosas. Por fim, nos solos classificados como médios ocorre

uma distribuição aproximadamente equitativa entre as frações granulométricas de argila, silte e areia.

Tabela 3 - Distribuição do percentual de área das bacias nas diferentes classes de declividade do terreno

Bacias Hidrográficas	Áreas Percentuais das Classes de Declividade (%)				
	0 - 3	3,1 - 6	6,1 - 12	12,1 - 20	20,1 - 164
Feijão	28	26	27,1	11,3	7,6
Chibarro	24,8	27,8	31,7	11,6	4,1
Araras	27,7	34,1	28,5	6,4	3,3
Cabaceiras	22,9	33,4	33,9	7,7	2,1
Gabirobas	66,5	26,8	6,2	0,5	0
Jacaré-Guaçu	17,7	21,8	27,8	15	17,7
Monjolinho	27,3	33,4	29,2	7,1	3
Pântano	13	20,5	26,4	20,9	19,2
Quilombo	20,9	26,2	28,7	13,1	11,1
Mogi-Guaçu	28,6	40,3	26,4	3,8	0,9

Tabela 4 - Distribuição percentual em área das bacias dos tipos de solo (textura) do município de São Carlos

Bacias Hidrográficas	Áreas Percentuais de Solos (Textura)		
	Granulares	Médios	Finos
Feijão	72,3	10,5	17,2
Chibarro	76,9	20,9	2,2
Araras	52,1	8	39,9
Cabaceiras	54,5	3,3	42,2
Gabirobas	75,4	16,1	8,5
Jacaré-Guaçu	28,7	44,6	26,7
Monjolinho	76	1,8	22,2
Pântano	72,7	27,3	0
Quilombo	32,1	7,8	60,1
Mogi-Guaçu	39,9	9,7	50,4

Observa-se que a bacia das Gabirobas apresenta 93% de sua área com declividades inferiores a 6%, consideradas de muito baixa e baixa suscetibilidade à erosão pluvial. Já a bacia do Pântano apresenta 40% da sua área total com declividades acima de 12%, que apresentam de alta a muita alta suscetibilidade à erosão pluvial.

Com relação aos solos, as bacias do Chibarro, Gabirobas e Pântano são as mais suscetíveis à erosão pluvial, pois mais de 70% de suas áreas é composta por solos de textura arenosa. As bacias do Quilombo e Mogi-Guaçu possuem mais de 50% de suas áreas totais constituído por solos de textura argilosa, caracterizados por apresentar menor suscetibilidade à erosão pluvial.

As Figuras 14 e 15 apresentam, respectivamente, o mapa com a distribuição das classes de declividade e o mapa dos tipos de solo predominantes nas bacias analisadas.

Figura 14 - Mapa de declividade das bacias de São Carlos

Figura 15 - Tipos de solo predominantes nas bacias do município de São Carlos

O mapa de uso e ocupação das bacias utilizado neste estudo para obter o indicador de pressão foi elaborado por Denúbila (2013) a partir de imagens de satélite Landsat-5 georreferenciadas do ano de 2011, sem o contraste linear das bandas, e imagens de 2010 e 2012 do *Google Earth* que auxiliaram no reconhecimento dos usos e cobertura. A classificação manual dos tipos de usos identificados nas imagens de satélite foi feita por meio de digitalização no SIG ArcGIS®. Por fim, o mapa obtido foi cruzado com os mapas e as informações apresentadas por Fernandes (2007), Fagundes (2010) e Scarpinella (2012) para definição de quatorze classes de uso e cobertura, apresentadas na Figura 16.

Figura 16 - Mapa de uso e ocupação das bacias de São Carlos. Fonte: Denúbila (2013)

O indicador de estado foi produzido com base no mapa de suscetibilidade à erosão desenvolvido por Denúbila (2013) utilizando os atributos declividade, curvatura do terreno, unidades pedológicas e uso e cobertura. Os quatro mapas, contendo estes atributos e suas classes, foram transformados em arquivo *raster*. Em seguida, estes mapas foram cruzados utilizando o Processo Analítico Hierárquico (AHP) desenvolvido por Thomas L. Saaty que consiste em um método de ponderação de atributos mediante uma escala de valores de 1 a 9 sugerida por Saaty (1980). No programa Excel, as matrizes de cada atributo e suas classes foram confeccionadas e os autovetores calculados. Finalmente, após multiplicar os atributos, gerou-se o mapa de suscetibilidade à erosão contendo cinco classes definidas mediante a ferramenta *natural breaks*.

A Tabela 5 apresenta a porcentagem de áreas das bacias inserida nas cinco classes de suscetibilidade à erosão. Observa-se que a bacia Mogi-Guaçu apresenta 84% de sua área total com terrenos de muito baixa e baixa suscetibilidade à erosão pluvial, enquanto a bacia do Pântano apresenta aproximadamente 53% de sua área total caracterizada como de alta e muito alta suscetibilidade à erosão. A Figura 17 apresenta o mapa de suscetibilidade à erosão pluvial nas bacias analisadas.

Tabela 5– Distribuição dos percentuais de área das bacias nas classes de suscetibilidade à erosão pluvial

Bacias Hidrográficas	Percentuais de área nas Classes de Suscetibilidade à Erosão Pluvial				
	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Feijão	15,5	18,8	33,8	26,8	5,1
Chibarro	13,4	32,7	30,1	21,5	2,3
Araras	27,2	29,3	29,4	12,2	1,9
Cabaceiras	10,3	38,1	30,7	19,7	1,2
Gabirobas	32,7	55,9	11,3	0,1	0
Jacaré-Guaçu	18,4	22,8	24,5	22,3	12
Monjolinho	37,4	34,5	16,4	10,9	0,8
Pântano	1,5	8,8	36,9	34,7	18,1
Quilombo	32,5	31,7	20,7	11,8	3,3
Mogi-Guaçu	59,4	24,8	10,2	5,4	0,2

Figura 17 - Mapa de suscetibilidade à erosão do município de São Carlos
Fonte: Denúbila (2013)

Na confecção do mapa de reservas ambientais do município de São Carlos, utilizado para compor o indicador de resposta, Denúbila (2013) considerou as reservas legais (RLs), áreas de proteção permanente (APPs), Estações Ecológicas (EEs) e áreas de proteção ambiental (APAs), conforme pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 - Reservas ambientais no município de São Carlos
Fonte: Denúbila (2013)

5.2 Indicadores de pressão, estado e resposta

O indicador de pressão selecionado, denominado uso e ocupação, pertence ao meio socioeconômico e mede a porcentagem de área das bacias do município de São Carlos utilizadas para instalação de loteamentos, área urbana e periurbana, mineração e do centro tecnológico da TAM linhas aéreas. Somente estes usos foram considerados, pois dentre as atividades identificadas no município, são os que mais afetam a integridade dos solos e, portanto, serviram de base na determinação da pressão por uso e ocupação a qual as bacias são submetidas. A Figura 19 constitui a ficha técnica do indicador de pressão, adaptada do modelo criado por Vieira (2009).

FICHA TÉCNICA DO INDICADOR DE PRESSÃO	
➤ Tipo: Posição em relação ao marco conceitual PER.	
(X) Pressão () Estado () Resposta	
➤ Questão ambiental: uso do solo	
➤ Dimensão:	
() Meio Físico () Meio Biótico (X) Meio Socioeconômico	
➤ Definição e objetivo: medir a porcentagem de área das bacias do município de São Carlos ocupadas por loteamentos, área urbana e periurbana, mineração e o centro tecnológico da TAM com o intuito de mensurar a pressão por uso e ocupação nas bacias	
➤ Descrição da metodologia: utilizar SIG para quantificar a porcentagem de área das bacias ocupadas pelos usos considerados, definir as classes de pressão pelo método <i>natural breaks</i> e, por fim, produzir o mapa com o agrupamento das bacias nas classes estabelecidas	
➤ Especificação dos dados necessários: área total das bacias e área das bacias ocupadas por loteamentos, área urbana e periurbana, mineração e o centro tecnológico da TAM	
➤ Unidade de medida: porcentagem	
➤ Metas a alcançar: agregar o indicador de pressão aos de estado e resposta para avaliar a questão da erosão nas bacias e, conseqüentemente, auxiliar na gestão destas áreas	
➤ Periodicidade: é ideal que a periodicidade do levantamento de dados sobre o uso e ocupação das bacias de São Carlos seja anual para que as informações estejam sempre atualizadas para serem utilizados na gestão e estudos destas áreas	
➤ Fontes de informação: mapa de uso ocupação do solo elaborado por Denúbila (2013)	
➤ Limitações do indicador: necessidade de utilizar dados atualizados para compor o indicador e obter resultados consistentes	
➤ Inter-relação com outros indicadores: suscetibilidade à erosão e reservas ambientais	

Figura 19 - Ficha técnica do indicador de pressão uso e ocupação

A Tabela 6 apresenta os valores do indicador de pressão calculados para as 10 bacias do município de São Carlos na qual se observa que as bacias submetidas à maior pressão por uso e ocupação são Feijão, Chibarro e Monjolinho, concentrando grande diversidade de atividades, incluindo área urbana e periurbana.

Tabela 6 - Indicador de pressão (uso e ocupação) obtido para as 10 bacias analisadas

Bacias Hidrográficas	Áreas (ha)		Indicador Pressão Uso (%)	Classificação
	Bacia	Usos críticos		
Feijão	12423,4	1919,5	15,5	Alto
Chibarro	3426,1	692,7	20,2	Alto
Araras	20098,4	122,3	0,6	Baixo
Cabaceiras	6608,3	0	0	Muito Baixo
Gabiobas	5602,2	29	0,5	Baixo
Jacaré-Guaçu	7818,5	0	0	Muito Baixo
Monjolinho	20915,6	6863,3	32,8	Muito Alto
Pântano	1678	0	0	Muito Baixo
Quilombo	29734,6	1144,2	3,8	Médio
Mogi-Guaçu	4674,2	0	0	Muito Baixo

A Figura 20 apresenta o mapa com a categorização das bacias nas classes de pressão definidas pelo método *natural breaks*.

Figura 20 - Mapa do indicador de pressão: uso e ocupação do solo

O indicador de estado escolhido, intitulado suscetibilidade à erosão pluvial, faz parte do meio físico e mede a porcentagem de áreas de alta e muita alta suscetibilidade à erosão em cada bacia hidrográfica do município de São Carlos. As informações pertinentes a este indicador são detalhadas na ficha técnica apresentada na Figura 21.

FICHA TÉCNICA DO INDICADOR DE ESTADO

➤ Nome do indicador: suscetibilidade à erosão pluvial
➤ Tipo: Posição em relação ao marco conceitual PER () Pressão (X) Estado () Resposta
➤ Questão ambiental: degradação do solo por erosão
➤ Dimensão: (X) Meio Físico () Meio Biótico () Meio socioeconômico
➤ Definição e objetivo: medir a porcentagem de áreas das bacias do município de São Carlos com alta e muita alta suscetibilidade à erosão com o intuito de determinar a vulnerabilidade destas áreas ao processo erosivo
➤ Descrição da metodologia: utilizar o SIG para quantificar o indicador, obter as classes de estado pelo método <i>natural breaks</i> e produzir o mapa com a divisão das bacias nas classes definidas
➤ Especificação dos dados necessários: área total das bacias e áreas de alta e muita alta suscetibilidade à erosão
➤ Unidade de medida: porcentagem
➤ Metas a alcançar: mensurar o estado de suscetibilidade à erosão pluvial de cada bacia e agregá-lo, posteriormente, aos indicadores de pressão e resposta para avaliar a questão da erosão nas bacias
➤ Periodicidade: anual, pois o ambiente está sempre sujeito a mudanças e qualquer alteração nas características do solo, uso e ocupação, vegetação e relevo podem interferir na suscetibilidade à erosão do terreno
➤ Fontes de informação: mapa de suscetibilidade à erosão elaborado por Denúbila (2013)
➤ Limitações do indicador: obter a suscetibilidade à erosão da área que, caso não esteja disponível, precisará ser determinada por meio da ponderação dos diversos atributos que a influenciam, demandando maior tempo para o cálculo do indicador.
➤ Inter-relação com outros indicadores: uso e ocupação do solo e reservas ambientais

Figura 21 - Ficha técnica do indicador de estado suscetibilidade à erosão

A Tabela 7 exibe os valores do indicador de estado e que apontam as bacias do Feijão, Jacaré – Guaçu e Pântano como as mais suscetíveis à erosão pluvial. Por outro lado, as bacias classificadas como de muito baixa suscetibilidade são Gabirobas e Mogi – Guaçu.

Tabela 7 - Indicador de estado (suscetibilidade à erosão pluvial) obtido para as 10 bacias analisadas

Bacias Hidrográficas	Áreas (ha)		Indicador de Estado (%)	Classificação
	Bacia	Alta e Muito Alta Suscetibilidade à Erosão Pluvial		
Feijão	12423,4	3963,7	31,9	Alto
Chibarro	3426,1	814,8	23,8	Médio
Araras	20098,4	2846,8	14,2	Baixo
Cabaceiras	6608,3	1381,3	20,9	Médio
Gabirobas	5602,2	6,5	0,1	Muito Baixo
Jacaré-Guaçu	7818,5	2687,7	34,4	Alto
Monjolinho	20915,6	2442,5	11,7	Baixo
Pântano	1678	885,5	52,8	Muito Alto
Quilombo	29734,6	4468,5	15	Baixo
Mogi-Guaçu	4674,2	259,6	5,6	Muito Baixo

Na Figura 22 pode-se visualizar o agrupamento das bacias nas classes de suscetibilidade à erosão estabelecidas.

Figura 22 - Mapa do indicador de estado: suscetibilidade à erosão

O indicador de resposta adotado, designado reservas ambientais, compõe o meio biótico e tem o objetivo de mensurar a porcentagem de área das bacias do município de São Carlos dedicadas às reservas legais, áreas de proteção ambiental, unidades de conservação e estações ecológicas.

As reservas ambientais contribuem para a proteção do solo ao limitar o uso e ocupação de uma área e preservar a cobertura vegetal. A Figura 22 apresenta a ficha técnica que detalha as informações referentes ao indicador de resposta.

FICHA TÉCNICA DO INDICADOR DE RESPOSTA

➤ Nome do indicador: reservas ambientais
➤ Tipo: Posição em relação ao marco conceitual PER () Pressão () Estado (X) Resposta
➤ Questão ambiental: proteção do solo
➤ Dimensão: () Meio Físico (X) Meio Biótico () Meio socioeconômico
➤ Definição e objetivo: mede a porcentagem de áreas das bacias do município de São Carlos ocupadas por reservas ambientais para precisar o grau de proteção dos recursos naturais proporcionado pelas reservas
➤ Descrição da metodologia: utilizar SIG para quantificar a porcentagem de área das bacias ocupadas por reservas ambientais, definir as classes de resposta pelo método <i>natural breaks</i> e, por fim, produzir o mapa com o agrupamento das bacias nas classes estipuladas
➤ Especificação dos dados necessários: área total das bacias e área das reservas ambientais existentes nas bacias de São Carlos
➤ Unidade de medida: porcentagem de áreas
➤ Metas a alcançar: determinar a resposta por reservas ambientais nas bacias e, em seguida, analisá-la em conjunto com os indicadores de pressão e estado para avaliar a questão da erosão nestas áreas
➤ Periodicidade: anual, pois é importante fiscalizar se as áreas das reservas ambientais estão sendo respeitadas e protegidas. Também é necessário atualizar o indicador sempre que houver o estabelecimento de novas reservas ou modificações nas áreas existentes
➤ Fontes de dados: mapa de reservas ambientais do município de São Carlos produzido por Denúbila (2013)
➤ Limitações do indicador: a dificuldade para fiscalizar e verificar se as áreas das reservas estão sendo respeitadas pode comprometer os valores obtidos por este indicador
➤ Inter-relação com outros indicadores: uso e ocupação do solo e suscetibilidade à erosão pluvial.

Figura 23 - Ficha técnica do indicador de resposta: reservas ambientais

Os valores do indicador de resposta calculados para cada bacia do município de São Carlos, expostos na Tabela 8, revelam que a bacia do Feijão possui a maior porcentagem de área destinada a reserva ambiental (89,5%) devido à presença da APA Corumbataí, enquanto as bacias do Monjolinho e Quilombo apresentam, respectivamente, apenas 8,4% e 9% de área de reservas.

Tabela 8 - Indicador de resposta (Reservas Ambientais) obtido para as 10 bacias analisadas

Bacias Hidrográficas	Áreas (ha)		Indicador Resposta Reservas (%)	Classificação
	Bacia	Reservas Ambientais		
Feijão	12423,4	11115	89,5	Muito Alto
Chibarro	3426,1	542,1	15,8	Médio
Araras	20098,4	2825,4	14,1	Baixo
Cabaceiras	6608,3	863,2	13,1	Baixo
Gabirobas	5602,2	1883,3	33,6	Alto
Jacaré-Guaçu	7818,5	3412,6	43,6	Alto
Monjolinho	20915,6	1746,6	8,4	Muito Baixo
Pântano	1678	231,9	13,8	Baixo
Quilombo	29734,6	2662,8	9	Muito Baixo
Mogi-Guaçu	4674,2	730,9	15,6	Médio

A Figura 24 mostra o mapa com as bacias do município de São Carlos classificadas a partir da aplicação do método *natural breaks* aos valores calculados para o indicador de resposta.

Figura 24 - Mapa do indicador de resposta: reservas ambientais.

5.3 Diagnóstico geoambiental das bacias com base no modelo PER

Os indicadores selecionados foram estruturados no modelo Pressão – Estado – Resposta (PER) para destacar as inter-relações existentes entre as atividades humanas, o estado dos recursos naturais e as estratégias de gestão adotadas, conforme mostra a Figura 25.

Figura 25 - Modelo PER voltado ao diagnóstico da vulnerabilidade à erosão das bacias de São Carlos

Posteriormente, utilizou-se a Análise de Agrupamentos para agregar e avaliar espacialmente os indicadores e, por fim, produzir o mapa de agrupamento das bacias. Estes procedimentos foram realizados em SIG empregando os valores dos indicadores como dados de entrada e a Distância Euclidiana como medida para apoiar a formação dos grupos. O resultado desta análise é apresentado no Quadro 7 e a Figura 26 exhibe o mapa de agrupamento produzido.

Quadro 7 - Características dos grupos de bacias obtidos pela análise de agrupamentos

GRUPO	CARACTERÍSTICAS	BACIAS
1	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão: muito alta (Monjolinho) e alta (Chibarro) • Estado: médio (Chibarro) e baixo (Monjolinho) • Resposta: muito baixa (Monjolinho) e média (Chibarro) 	CHIBARRO E MONJOLINHO
2	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão: alta • Estado: alto • Resposta: muito alta 	FELJÃO
3	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão: muito baixa (Mogi - Guaçu) e baixa (Gabiobas) • Estado: muito baixo • Resposta: alta (Gabiobas) e média (Mogi-Guaçu) 	GABIROBAS E MOGI – GUAÇU
4	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão: muito baixa (Cabaceiras), baixa (Araras) e média (Quilombo) • Estado: baixo (Araras e Quilombo) e médio (Cabaceiras) • Resposta: muito baixa (Quilombo) e baixa (Cabaceiras e Araras) 	CABACEIRAS, ARARAS E QUILOMBO
5	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão: muito baixa • Estado: muito alto (Pântano) e alto (Jacaré-Guaçu) • Resposta: baixo (Pântano) e alto (Jacaré-Guaçu) 	JACARÉ – GUAÇU E PÂNTANO

Figura 26 - Mapa de agrupamento das bacias de São Carlos

As bacias do grupo 1, Chibarro e Monjolinho, possuem uma resposta baixa em vista da alta pressão que exibem. Apresentam algumas reservas legais que são áreas localizadas em propriedades rurais e cujos recursos podem ser utilizados de modo sustentável. Dentre os usos identificados, encontram-se área urbana e periurbana, loteamentos e mineração. A suscetibilidade à erosão não é muito alta, porém devido à grande quantidade de usos nestas bacias, é necessário cautela para que não haja o desenvolvimento de erosão.

O grupo 2 é composto somente pela bacia do Feijão, cujas características singulares a destacam das demais. Exibe alta pressão de uso e ocupação, alta suscetibilidade à erosão e resposta muito alta devido à presença da área de proteção ambiental Corumbataí. As áreas de preservação ambiental permitem certo grau de atividade humana, mas ajudam a controlar o uso e ocupação para não sobrecarregar os recursos naturais. Deste modo, a presença da APA Corumbataí na bacia do Feijão contribui para a proteção do solo, uma vez que é uma área bastante ocupada por atividades antrópicas e muito suscetível à erosão.

No grupo 3 situam-se as bacias Mogi-Guaçu e das Gabirobas que são pouco ocupadas e têm suscetibilidade à erosão muito baixa. Além disso, na bacia Mogi-Guaçu há algumas áreas de reservas legais e na bacia das Gabirobas localiza-se a Estação Ecológica do Jataí, Unidade de Conservação de Proteção Integral em que a interferência humana deve ser evitada para não alterar o ecossistema.

O grupo 4 é formado pelas bacias das Cabaceiras, Araras e Quilombo, possuindo a existência de poucas reservas legais em suas áreas. São bacias extensas que, em geral, apresentam baixo uso e ocupação e baixa suscetibilidade à erosão.

As bacias do grupo 5 são Jacaré – Guaçu e Pântano. Ambas exibem muito baixa pressão e alta suscetibilidade à erosão, contudo a Jacaré – Guaçu apresenta uma resposta elevada devido a presença da Estação Ecológica de São Carlos, enquanto a bacia do Pântano possui baixa resposta, pois em sua área há apenas uma porção da APA Corumbataí e algumas reservas legais.

As características destes grupos podem conduzir a elaboração de estratégias de gestão adequadas a cada condição identificada, pois, as deliberações aplicadas em todo município, muitas vezes, não são suficientes para abarcar a heterogeneidade de cenários existentes na realidade urbana. As bacias do grupo 1, por exemplo, merecem atenção especial dos gestores por concentrarem elevado uso e ocupação e poucas reservas que, mesmo com a baixa suscetibilidade à erosão, deixam o solo mais exposto ao processo

erosivo devido a alteração da cobertura vegetal. No outro extremo, as bacias do tipo 3 demonstram ter o menor potencial de degradação por erosão e, por esse motivo, não constituem áreas prioritárias para a gestão.

A matriz de vulnerabilidade foi outro método utilizado para agregar os indicadores e medir o potencial de degradação por erosão das bacias do município de São Carlos. Mediante o uso do SIG, inicialmente foi construída uma matriz para ponderar os indicadores de pressão e estado, conforme mostra a Figura 27, em que cada bacia obteve um número de 1 a 5 correspondente às classes nas quais os valores dos indicadores de pressão e resposta foram categorizados: muito baixa (MB) = 1, baixa (B) = 2, média (M) = 3, alta (A) = 4 e muita alta (MA) = 5.

BACIAS			B1 ¹	B2 ²	B3 ³	B4 ⁴	B5 ⁵	B6 ⁶	B7 ⁷	B8 ⁸	B9 ⁹	B10 ¹⁰
INDICADOR			ESTADO (Susceptibilidade à Erosão Pluvial)									
			4	3	2	3	1	4	2	5	2	1
B1	PRESSÃO (Uso e Ocupação)	4	16									
B2		4		12								
B3		2			4							
B4		1				3						
B5		2					2					
B6		1						4				
B7		5							10			
B8		1								5		
B9		3									6	
B10		1										1

Figura 27 - Matriz Indicador de Pressão vs Indicador de Estado

(1) B1 = Feijão; (2) B2 = Chibarro; (3) B3 = Araras; (4) B4 = Cabaceiras; (5) B5 = Gabirobas; (6) B6 = Jacaré - Guaçu; (7) B7 = Monjolinho; (8) B8 = Pântano; (9) B9 = Quilombo; (10) B10 = Mogi - Guaçu

Um mapa (Figura 28) foi produzido a partir dos resultados da matriz Pressão vs Estado reclassificados em cinco classes pelo critério *natural breaks* para visualizar o processo de obtenção do agrupamento final das bacias pela matriz de vulnerabilidade.

Figura 28 - Mapa Pressão vs. Estado

Em seguida, o resultado da primeira matriz, denominado índice pressão e estado, foi agregado ao indicador de resposta em uma segunda matriz como pode ser observado na Figura 29. Destaca-se que o valor 1, no caso do indicador de resposta, representa a

existência de muitas reservas ambientais na bacia, ou seja, o contrário dos outros indicadores para os quais o 1 denota poucas áreas com alta e muita alta suscetibilidade à erosão e baixa pressão de uso e ocupação.

BACIAS			B1 ¹	B2 ²	B3 ³	B4 ⁴	B5 ⁵	B6 ⁶	B7 ⁷	B8 ⁸	B9 ⁹	B10 ¹⁰
INDICADOR			RESPOSTA (Reservas Ambientais)									
			1	3	4	4	2	2	5	4	5	3
B1	PRESSÃO E ESTADO	16	16									
B2		12		36								
B3		4			16							
B4		3				12						
B5		2					4					
B6		4						8				
B7		10							50			
B8		5								20		
B9		6									30	
B10		1										3

Figura 29 - Matriz final: Índice pressão e estado vs. Indicador de resposta

(1) B1 = Feijão; (2) B2 = Chibarro; (3) B3 = Araras; (4) B4 = Cabaceiras; (5) B5 = Gabirobas; (6) B6 = Jacaré - Guaçu; (7) B7 = Monjolinho; (8) B8 = Pântano; (9) B9 = Quilombo; (10) B10 = Mogi - Guaçu

O resultado final da matriz de vulnerabilidade foi reclassificado em cinco classes pelo método *natural breaks*, agrupando as bacias do município conforme mostra a Figura 30.

Figura 30 - Mapa Pressão x Estado x Resposta

O Quadro 8 mostra a classificação das bacias de acordo com o método matriz de vulnerabilidade.

Quadro 8 - Classificação das bacias quanto ao potencial de degradação à erosão

CLASSE	CARACTERÍSTICAS	BACIAS
MUITO BAIXO	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão: baixa (Gabiobas) e muito baixa (Mogi-Guaçu) • Estado: muito baixo • Resposta: alto (Gabiobas) e médio (Mogi-Guaçu) 	GABIROBAS E MOGI-GUAÇU
BAIXO	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão: muito baixa • Estado: alto (Jacaré - Guaçu) e médio (Cabaceiras) • Resposta: alto (Jacaré - Guaçu) e baixo (Cabaceiras) 	JACARÉ – GUAÇU E CABACEIRAS
MÉDIO	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão: baixa (Araras), alta (Feijão), muito baixa (Pântano) • Estado: baixo (Araras), alto (Feijão) e muito alto (Pântano) • Resposta: baixo (Araras), muito alto (Feijão) e baixo (Pântano) 	ARARAS, FEIJÃO E PÂNTANO
ALTO	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão: alta (Chibarro) emédia (Quilombo) • Estado: médio (Chibarro), baixo (Quilombo) • Resposta: médio (Chibarro) e muito baixo (Quilombo) 	CHIBARRO E QUILOMBO
MUITO ALTO	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão: muito alta • Estado: baixo • Resposta: muito baixo 	MONJOLINHO

A bacia do Monjolinho foi apontada como a de maior potencial de degradação por erosão no município de São Carlos, visto que, apesar de apresentar baixa suscetibilidade à erosão, possui muito alta pressão de uso e ocupação e muito baixa resposta. Por ser urbanizada, concentra atividades diversificadas que são pouco limitadas, pois não existem muitas reservas ambientais nesta bacia, aumentando a exposição do solo ao processo erosivo.

Já as bacias consideradas de menor potencial de degradação por erosão foram

Gabirobas e Mogi-Guaçu. Ambas apresentam pouco uso e ocupação e são afastadas do centro urbano, restringindo as atividades instaladas nestas áreas à agricultura, plantio de eucalipto, cultivo de cana-de-açúcar e pastagens. Além disso, são regiões de baixa suscetibilidade à erosão, devido à predominância de solos finos na bacia das Gabirobas e declividades reduzidas nas duas. A resposta é alta na bacia das Gabirobas, uma vez que abriga a Estação Ecológica do Jataí, e média na bacia do Mogi-Guaçu, em virtude da presença de áreas de reserva legal.

As bacias classificadas como de médio potencial de degradação por erosão apresentam características heterogêneas, mas que as expõe a uma probabilidade de desenvolvimento de erosão semelhante. Fazem parte deste grupo as bacias das Araras, Feijão e Pântano.

Embora a classificação da bacia das Araras como de médio potencial erosivo pareça equivocada, pode ser explicada pelo fato de, apesar de apresentar baixa pressão e suscetibilidade à erosão, também possui pequena quantidade de reservas legais que proporciona menor controle sobre a utilização dos recursos naturais da bacia, reduzindo a proteção contra a erosão.

Quanto a bacia do Feijão, apesar da alta pressão e suscetibilidade à erosão, apresenta muito alta resposta, devido a APA Corumbataí, que contribui para regular o uso e ocupação da área e, conseqüentemente, proteger o solo do processo erosivo. Por fim, a bacia do Pântano possui pressão muito baixa, porém a muito alta suscetibilidade à erosão e baixa resposta conferem um potencial de erosão para a área considerado médio.

O grupo classificado como de baixo potencial de degradação por erosão é composto pelas bacias Jacaré – Guaçu e Cabaceiras que possuem muito baixo uso e ocupação. Além disso, a bacia do Jacaré – Guaçu tem alta suscetibilidade à erosão, mas em contrapartida apresenta alta resposta devido a Estação Ecológica de São Carlos. Já a bacia das Cabaceiras, possui média suscetibilidade à erosão e baixa resposta.

Por fim, as bacias classificadas como de alto potencial de degradação por erosão são Chibarro e Quilombo. A bacia do Chibarro possui alta pressão, média suscetibilidade à erosão e média resposta, enquanto a bacia do Quilombo apresenta média pressão, baixa suscetibilidade à erosão e muito baixa resposta.

Os resultados revelam que quanto maior o equilíbrio entre pressão, estado e resposta, menor será o potencial de degradação por erosão, isto é, uma área com alta pressão e/ou alta suscetibilidade à erosão deve apresentar alta resposta para reduzir o potencial de degradação por erosão, como ocorre na bacia do Feijão, por exemplo.

Conforme esperado, as bacias caracterizadas como de alto e muito alto potencial são urbanizadas ou próximas de centros urbanos que apresentam alta pressão associada à uma baixa resposta. Enquanto as bacias consideradas como de baixo e muito baixo potencial têm, em geral, baixa pressão e alta resposta.

As bacias com alta pressão apresentaram maior potencial erosivo, devido à modificação da cobertura vegetal que favorece o desenvolvimento da erosão. Já a existência de reservas ambientais restringe as atividades nas bacias, fornecendo proteção ao solo, por isso, as áreas com maior porcentagem de reservas exibiram menor potencial de degradação por erosão.

O indicador de estado auxilia na verificação de conflitos entre uso e ocupação e a capacidade de suporte de uma área. O manejo inadequado de um solo com alta suscetibilidade à erosão acelera sua degradação, principalmente quando ligado à baixa proteção por reservas ambientais. No município de São Carlos não há uso e ocupação intenso em bacias com alta suscetibilidade à erosão e baixa quantidade de reservas. Contudo, mesmo as áreas com baixa suscetibilidade, quando sujeitas à alta pressão e baixa resposta, exibem alto potencial de degradação por erosão devido a retirada de cobertura vegetal e uso intenso dos recursos do solo.

A ponderação de indicadores pela matriz de vulnerabilidade demonstrou ser uma boa ferramenta para o diagnóstico preliminar de uma área, pois revela a existência de conflitos entre as características naturais e a ação humana. Entretanto, é importante a interpretação cuidadosa dos resultados para definir as áreas com prioridade de gestão. No caso do grupo com médio potencial de degradação por erosão, apesar de sugerir atenção moderada dos gestores, inclui bacias que de fato não apresentam condição crítica.

A bacia das Araras, por exemplo, foi classificada como de médio potencial devido à baixa resposta, mesmo apresentando também baixa pressão e suscetibilidade à erosão. A diversidade biológica de algumas áreas não justifica a sua proteção por reservas ambientais, o que permitiu maior uso dos recursos. Entretanto, a ausência de reservas não é suficiente para o desenvolvimento de erosão, pois outras medidas podem ser utilizadas para compensar esta falta. Por isso, recomenda-se o uso de um sistema maior de indicadores que permita o diagnóstico mais concreto da área e evite resultados controvertíveis.

A diferença básica entre a matriz de vulnerabilidade e a análise de agrupamento está no modo de sintetizar a informação. No caso da matriz, os indicadores foram agregados para produzir um índice que classificou as bacias de acordo com o potencial

de degradação por erosão. Já a análise de agrupamentos criou grupos de bacias a partir de semelhanças no uso e ocupação, suscetibilidade à erosão e resposta.

Devido à distinção no modo de agregar os indicadores, estes métodos geram diferentes agrupamentos e interpretações dos indicadores. Apesar disso, deve-se mencionar que as bacias das Gabirobas e Mogi – Guaçu foram dispostas no mesmo grupo pelos dois métodos.

Além disso, os resultados fornecidos pela análise de agrupamento demonstraram demandar maior esforço para interpretar o que os indicadores comunicam, pois cabe ao pesquisador analisar as características de cada grupo e definir qual deles deve ter prioridade na elaboração de estratégias de gestão. Enquanto a matriz de vulnerabilidade quantifica a informação e revela as áreas mais críticas, uma vez que categoriza as bacias conforme o maior ou menor valor de potencial de degradação por erosão.

Por fim, os produtos destas análises mostram haver diferentes formas de interpretar os indicadores e utilizá-los como ferramentas de gestão, cabendo aos administradores, pesquisadores e usuários em geral decidir qual o método mais adequado para os objetivos estabelecidos.

6. CONCLUSÃO

O modelo de indicadores PER contribuiu para selecionar os indicadores e evidenciar a rede causa-efeito existente entre as interferências humanas no ambiente, as características naturais da área e as medidas de gestão adotadas. O propósito de construir uma rede causal foi compreender a maneira como os indicadores de pressão, estado e resposta interagem e influenciam o processo erosivo.

Quanto a matriz de vulnerabilidade e a análise de agrupamentos, demonstraram auxiliar na avaliação preliminar da área de estudo, sintetizando grande quantidade de informações para torná-las disponíveis às partes interessadas como suporte à tomada de decisão. A matriz destacou o grau de potencial de degradação por erosão das bacias, ao passo que a análise de agrupamentos gerou grupos de bacias semelhantes que podem ser utilizados para orientar políticas públicas pontuais.

Concluiu-se que a metodologia utilizada neste estudo possibilita acrescentar e atribuir pesos aos indicadores de acordo com as necessidades do usuário/pesquisador. No caso desta pesquisa, por exemplo, se as pastagens fossem consideradas áreas sob alta pressão haveria uma mudança nos resultados que provavelmente abarcaria no aumento do potencial de degradação por erosão das bacias hidrográficas da zona rural do município. No entanto, para atingir os objetivos do presente estudo optou-se por considerar como de alta e muita alta pressão apenas as áreas urbana e peri-urbana, loteamentos, mineração e instalações da TAM linhas aéreas.

Além disso, constatou-se que a aplicação conjunta do modelo PER com a matriz de vulnerabilidade e/ou análise de agrupamentos pode contribuir para a gestão ambiental ao auxiliar na tomada de decisão e ser capaz, inclusive, de apoiar a elaboração dos Planos Diretores municipais. Este modelo demonstrou ser útil para o gerenciamento e diagnóstico geoambiental de bacias hidrográficas, pois, seleciona e sistematiza indicadores que facilitam a análise de grande quantidade de informação e apontam a condição ambiental destas áreas.

Algumas das dificuldades encontradas durante a realização desta pesquisa envolveram o levantamento de dados devido à disponibilidade e qualidade das informações existentes, pois, grande parte não está sistematizada por bacia hidrográfica ou é inacessível aos cidadãos. Dados cedidos pela Prefeitura Municipal de São Carlos, SAAE, IBGE e CETESB não abarcavam todas as bacias do município, inviabilizando a utilização neste estudo.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que trabalhos futuros utilizem maior quantidade de indicadores para um diagnóstico socioambiental mais completo das bacias do município de São Carlos. Além disso, propõe-se o cálculo da autocorrelação espacial dos indicadores ambientais das bacias de São Carlos e a realização de estudos que utilizem o modelo PER para selecionar e organizar os indicadores, a matriz de vulnerabilidade como método de construção de índices e, por fim, a análise de agrupamentos para a avaliação espacial dos índices de modo a formar grupos que evidenciem os diferentes cenários presentes no município.

Outra proposta de pesquisa é considerar as pastagens como áreas de alta e muita alta suscetibilidade à erosão para avaliar os resultados decorrentes desta alteração na ponderação dos indicadores. Também, incentiva-se a aplicação desta metodologia em outras questões ambientais como, por exemplo, a erosão em locais de disposição final de resíduos sólidos.

REFERÊNCIAS

- ABDON, M. M. **Os impactos ambientais no meio físico: erosão e assoreamento na bacia hidrográfica do rio Taquari (MS) em decorrência da pecuária.** 2004. 302 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- ALBUQUERQUE, A. R. C. Bacia hidrográfica: unidade de planejamento ambiental. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 4, n. 4, p. 201–209, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil:** 2013. Brasília: ANA, 2013.
- ARAÚJO, L. E. de et al. Bacias hidrográficas e impactos ambientais. **Qualitas Revista Eletrônica**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 1-18, 2009. Disponível em: <<http://revista.uepb.edu.br/index.php/qualitas/article/download/399/366>>. Acesso em: 5 mar. 2016.
- AZAMBUJA, S. **Estudo e implementação da análise de agrupamento em ambientes virtuais de aprendizagem.** 2005. 197 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Instituto de Matemática/ Núcleo de Computação Eletrônica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- BARTOLOMEU, D. **Análise da vulnerabilidade dos recursos hídricos na região urbana de São Carlos (SP) por vazamentos em postos de combustíveis, utilizando o método GOD de avaliação dos condicionantes geotécnicos.** 2012. 205 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- BATISTA, M. E. M. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para a gestão urbana baseado em indicadores ambientais.** 2005. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.
- BELLEN, H. M. V. **Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa.** 2002. 235 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- BERGER, A. R. Assessing rapid environmental change using geoindicators. **Environment Geology**, Berlin, v. 1, n. 32, p. 35–44, Jul. 1997.

BERGER, A. R. Environmental change, geoindicators, and the autonomy of nature. **GSA TODAY**, Boulder, v. 8, n. 1, p. 3–8, Jan. 1998. Disponível em: <<ftp://rock.geosociety.org/pub/GSAToday/gt9801.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2015.

BESSA JUNIOR, O.; MÜLLER, A. C. P. Indicadores ambientais georreferenciados para a área de proteção ambiental de Guaraqueçaba. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, Curitiba, n. 99, p. 105-119, jul./dez. 2000. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/pdf/revista_PR/99/bessa.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2015.

BIDONE, E. D.; MORALES, P. R. D. **Desenvolvimento sustentável e engenharia: (enfoque operacional)**. Rio de Janeiro: Fundação Ricardo Franco, 2004. (Coleção Disseminar).

BITAR, O. Y.; ORTEGA, R. D. Gestão ambiental. In: BRITO, S. N. A.; OLIVEIRA, A. M. S. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 499-508.

BORSOI, Z. M. F.; TORRES, S. D. A. A Política de recursos hídricos no Brasil. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 8, p. 143-166, dez. 1997. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev806.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2016.

BRASIL. Decreto nº 18.997, de 15 de junho de 1982. Cria a Estação Ecológica de Jataí e dá providências correlatas. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Decretos/1982/dec_18997_1982_estacaoecologicajatai_sp.pdf> Acesso em: 3 mar. 2016.

_____. Resolução Conama nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre procedimentos relativos a Estudo de Impacto Ambiental. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>>. Acesso em: 6 maio 2015.

_____. Decreto nº 26.890, de 12 de Março de 1987. Cria as Estações Ecológicas de Bananal, Bauru, Ibicatu, Itaberá, Itapeti, São Carlos, Valinhos e Xitúe e dá providências correlatas. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF. Disponível em: <<http://governo-sp.jusbrasil.com.br/legislacao/190668/decreto-26890-87>>. Acesso em: 25 mar. 2016.

_____. Lei nº 7.663, de 30 de dezembro de 1991. Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de

Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 31 dez. 1991. Seção 1, v. 101, n. 247.

_____. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 9 de jan. 1997. Seção 1, p. 470-474. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm>. Acesso em: 2 jul. 2014.

_____. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 19 de jul. 2000. Seção 1, p.45-48. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9985.htm>. Acesso em: 12 nov. 2015.

_____. **Livro Azul: 4ª Conferência Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação para o Desenvolvimento Sustentável**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos/Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010.

_____. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Produto 4**: guia referencial para medição de desempenho e manual para construção de indicadores. Brasília: [s.n.], 2009. Disponível em: <http://www.gespublica.gov.br/Tecnologias/pasta.2010-05-24.1806203210/guia_indicadores_jun2010.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2015.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **PNIA 2012**: Painel Nacional de Indicadores Ambientais: referencial teórico, composição e síntese dos indicadores da versão-piloto. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2014.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Indicadores ambientais**. Brasília: [s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/governanca-ambiental/informacao-ambiental/sistema-nacional-de-informacao-sobre-meio-ambiente-sinima/indicadores>>. Acesso em: 21 jan. 2015.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/sistema-nacional-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos>>. Acesso em: mai. 2016.

CÂMARA, G. et al. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004.

CARVALHO, E. M. **Análise diagnóstica de indicadores de erosão do solo na bacia hidrográfica do Córrego João Dias, Aquidauana – MS**. 2012. 143 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2012.

CARVALHO, P. G. M.; BARCELLOS, F. C. Políticas públicas e sustentabilidade ambiental: construindo indicadores de sustentabilidade. **Revistas Eletrônicas FEE**, Porto Alegre, v. 37, n. 1, p. 1-14, 2009. Disponível em: <<http://revistas.fee.tche.br/index.php/indicadores/article/viewFile/2280/2656>>. Acesso em: 22 fev. 2015.

CARVALHO, P. G. M. et al. Indicadores para a avaliação da gestão ambiental municipal com base no modelo Pressão – Estado – Resposta. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS, 14., 2008, Caxambú. **Anais...** Belo Horizonte: ABEP, 2008. p. 1-20. Disponível em: <http://www.abep.nepo.unicamp.br/encontro2008/docspdf/ABEP2008_1403.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2015.

CARVALHO, P. G. M.; BARCELLOS, F. C.; MOREIRA, G. G. Políticas públicas para meio ambiente no semi-árido brasileiro: regressão logística com o Modelo PER. **Revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica**, Morelia, v. 12, p.67 – 84, 2009. Disponível em: <<http://www.raco.cat/index.php/Revibec/article/viewFile/164734/216710>>. Acesso em: 8 maio 2015.

CASANOVA, M. A. et al. **Banco de dados geográficos**. Curitiba: Mundogeo, 2005.

CASTRO, L. C. **O Contexto legal da gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Alto Iguaçu – PR**. 2005. 91 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Gestão Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CELESTINO, T. B.; DINIZ, N. C. Informática. In: BRITO, S. N. A.; OLIVEIRA, A. M. S. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. cap. 14, p. 227-241.

COELHO, A. M. **Proposta para um indicador global de avaliação desustentabilidade ambiental de empreendimentos (IGSA)**. 2008. 182 f. Dissertação (Mestrado em Urbanismo) – Departamento de Arquitetura, Urbanismo, Geografia e Artes Plásticas, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, 2008.

COELHO, A. M. et al. Análise da suscetibilidade à erosão laminar no município de Itaperuna/ RJ usando técnicas de geoprocessamento. In: Geojuvem, 2., 2006, Nova Friburgo. **Anais...** Nova Friburgo, 2006. 1 CD-ROM. Disponível em: <<http://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/IIgeojuvem2006/2006-coelho-oliveira.pdf>>. Acesso em: 17 mai. 2016.

COMISSÃO ECONÔMICA PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE.
Indicadores de aplicação e cumprimento da norma ambiental para ar, água e vegetação no Brasil. Santiago: Nações Unidas, 2007. (Colección Documentos de Proyectos).

CORVALÁN, S. B. **Zoneamento ambiental da APA Corumbataí (SP) de acordo com critérios de vulnerabilidade ambiental.** 2009. 170 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2009.

COSTA, R. J. Z. **Sistema de indicadores de sustentabilidade para gestão e planejamento de recursos hídricos de bacias hidrográficas:** o caso da bacia hidrográfica do rio Almada - BA. 2013. 292 f. Tese (Doutorado em Ciências Sociais) – Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

COSTA, R. J. Z.; COSTA, F. M.; NASCIMENTO, V. A. Construção social de indicadores ambientais para a gestão de bacias hidrográficas. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO SOBRE DESAROLLO Y AMBIENTE, 5., 2011, Santa Fé. **Anais...** Santa Fé: [s.n.], 2011. Disponível em:<http://fich.unl.edu.ar/CISDAV/upload/Ponencias_y_Posters/Eje07/Zumaeta_Costa_Mendes_Costa_Nascimento/Artigo%20final%20V%20CISDA.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2015.

CUNHA, L. H.; COELHO, M. C. N. Política e gestão ambiental. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Orgs.). **A Questão ambiental:** diferentes abordagens. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009. p. 43-79.

CRUZ, I; CAMPOS, V. B. G. C. Sistemas de Informações Geográficas aplicados à análise espacial em transportes, meio ambiente e ocupação do solo. In: RIO DE TRANSPORTES, 3., 2005, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2005. p. 1-12.

DENÚBILA, L. A. **Alterações ambientais associadas à mineração no município de São Carlos (SP), utilizando AHP e SIG.** 2013. 292 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

DIAS, F. A.; GOMES, L. A.; ALKIMIM, J. K. Avaliação da qualidade ambiental urbana da bacia do Ribeirão do Lipa através de indicadores, Cuiabá/MT. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 23, n.1, p. 127 – 147, abr. 2011. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/11389/pdf_36>. Acesso em: 19 abr. 2016.

DIRECÇÃO GERAL DO AMBIENTE. **Proposta para um sistema de indicadores desesenvolvimento sustentável**. Lisboa: Direcção Geral do Ambiente, 2000.

DONI, M. V. **Análise de cluster**: métodos hierárquicos de particionamento. 2004. 93 f. Trabalho apresentado à disciplina de Trabalho de Graduação Interdisciplinar II (Bacharelado em Sistemas de Informação) – Faculdade de Computação e Informática, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2004.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **EEA core set of indicators guide**. Copenhagen: [s.n.], 2005.

FAGUNDES, J. R. T. **Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos – SP**. 2010. 397 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

FANTINATTI, P. A. P.; FERRÃO, A. M. A.; ZUFFO, A. C (Coord.). **Indicadores de sustentabilidade em engenharia**: como desenvolver. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

FERNANDES, A. L. **Oferta e demanda de agregados para a construção civil no município de São Carlos – SP**. 2007. 126 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Centro Universitário de Araraquara, Araraquara, 2007.

FERREIRA, N. C. **Apostila de Sistema de Informação Geográficas**. Goiânia: Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás, 2006.

FIDALGO, E. C. C. **Critérios para a análise de métodos e indicadores ambientais usados na etapa de diagnóstico de planejamentos ambientais**. 2003. 276 f. Tese (Doutorado em Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FIGUEIREDO, M. A. G. O Uso de indicadores ambientais no acompanhamento de sistemas de gerenciamento ambiental. **Revista Produção**, Belo Horizonte, v. 6, n. 1, p. 33-44, jul. 1996. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/prod/v6n1/v6n1a02>>.

Acesso em: 6 fev. 2015.

FRANÇA JÚNIOR, P.; VILLA, M. E. C. D. O Ambiente geográfico e os geoindicadores. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 4, n. 2, p. 337-348, jul./ago. 2011. Disponível em: <<http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/viewFile/177/174>>. Acesso em: 8 maio 2015.

FRANCO, A. M. P. **Erosão em entressulcos e qualidade física de solos construídos após mineração de carvão**. 2010. 95 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

FREITAS, A. R.; MARTINS, F. Identificação das unidades de paisagem na bacia hidrográfica do Arroio dos Pereiras, em Irati – PR. **Perspectiva**, Erechim, v. 38, n. 143, p. 39-49, set. 2014. Disponível em: <http://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/143_432.pdf>. Acesso em: 8 maio 2015.

GAROTTI, L. M. **Caracterização urbanística e hidrológica do uso e ocupação do solo urbano da cidade de Ribeirão Preto – SP**. 2008. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

GEO cidade de São Paulo: panorama do meio ambiente urbano. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo, 2004.

GARBELINI, S. M. **Manual prático de unidades de conservação**. Goiânia: Ministério Público do Estado de Goiás, 2011.

GOMES, P. R. **Indicadores ambientais na discussão da sustentabilidade: uma proposta de análise estratégica no contexto do etanol de cana-de-açúcar no estado de São Paulo**. 2011. 166 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

GUIMARÃES, R. P.; FEICHAS, S. A. Q. Desafios na construção de indicadores de sustentabilidade. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 12, n.2, p. 307-323, jul./dez. 2009.

GUIMARÃES, L. T. **Proposta de um sistema de indicadores de desenvolvimento sustentável para bacias hidrográficas**. 2008. 253 f. Tese (Doutorado em Ciências em

Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

HADLICH, G. M. Análise de relações entre declividade e uso do solo com auxílio do geoprocessamento, município de Sombrio – SC. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6., 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: UFG, 2006. Disponível em: <<http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/sinageo/articles/407.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

HALES, D.; PRESCOTT-ALLEN, R. Vôo cego: avaliação do progresso rumo à sustentabilidade. In: ESTY, D. C.; IVANOVA, M. H. (Orgs.). **Governança ambiental global: opções e oportunidades**. Tradução de Assef Nagib. São Paulo: Senac São Paulo, 2005. p. 39-62.

HAMMES, V.S. (Ed). Erosão, um indicador de impacto ambiental. In: _____. **Julgado: percepção do impacto ambiental**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2012. p. 77 – 81.

HAMMOND, A. et al. **Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development**. Washington, D.C.: World Resources Institut, 1995.

HAN, J.; KAMBER, M.; PEI, J. **Data mining: concepts and techniques**. 3rd ed. Waltham: Elsevier, 2012.

HIGGINS, R. D.; WOOD, J. Geoindicators: a tool for monitoring the ecosystem and understanding the resources. In: HARMON, D. (Ed.) CONFERENCE ON RESEARCH AND RESOURCE MANAGEMENT IN PARKS AND ON PUBLIC LANDS, 11., 2001, Hancock. **Proceedings...** Hancock: George Wright Society, 2001. p. 239-244.

HIRAI, J. N.; AUGUSTO FILHO, O. Avaliação ambiental por meio de geoindicadores: aplicação de erosão de solos e sedimentos. **Revista Minerva**, São Carlos, v. 5, n. 1, p. 35-43, 2008.

IMESON, A.; CURFS, M. Soil erosion. [S.l.]: Foundation for sustainable development, 2009. (Booklet Series B, number 1).

KEMERICH, P. D. C. et al. Avaliação da sustentabilidade ambiental em bacias hidrográficas mediante a aplicação do modelo P-E-R. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 10, n. 10, p. 2140-2150, jan./abr. 2013. Disponível em: <<http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/reget/article/view/7658/pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2015.

KRAEMER, M. E. P. Indicadores ambientais como sistema de informação. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 24., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABEPRO, 2004. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2004_Enegep1002_0087.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2015.

KRAMA, M. R. **Análise dos indicadores de desenvolvimento sustentável no Brasil, usando a ferramenta painel de sustentabilidade**. 2009. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2009. Disponível em: <<http://www.produtronica.pucpr.br/sip/conteudo/dissertacoes/pdf/marciakrama.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2015.

KRONEMBERGER, D. M. P.; CARVALHO, C. N.; JÚNIOR, J. C. Indicadores de sustentabilidade em pequenas bacias hidrográficas: uma aplicação do “barômetro da sustentabilidade” à bacia do Jurumirim (Angra dos Reis, RJ). **Geochimica Brasilienses**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 86-98, 2004. Disponível em: <<http://geobrasiliensis.org.br/ojs/index.php/geobrasiliensis/article/viewFile/214/pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2015.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. UNESP Rio Claro: Departamento de Geologia Aplicada, 2000. Texto didático 03. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/multivariados.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2015.

LAVARINI, C.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; OLIVEIRA, F. S. de. Análise de agrupamentos de bacias hidrográficas como procedimento-guia para o estudo e a amostragem de coberturas superficiais. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 66, p. 1039-1050, set./out. 2014. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php?journal=rbc&page=article&op=view&path%5B%5D=669>>. Acesso em: 2 fev. 2016.

LAVORATO, M. L. A. **A Importância dos indicadores de desenvolvimento ambiental para a competitividade das empresas e iniciativas ambientais**. São Paulo: Mais Projetos, 2003. Disponível em: <<https://jcbasilio.files.wordpress.com/2009/10/a-importancia-dos-indicadores.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2015.

LEMES, M. J. R. **Complexidade, acoplamento e criticidade (C²A) como indicadores de risco em projetos de sistemas**. 2012. 278 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

LIMA, E. R. V. de. Erosão do solo: fatores condicionantes e modelagem matemática.

Revista Cadernos do Logepa, João Pessoa – PB, v. 3, n. 1, 2004, p. 1-46. Disponível em: <<http://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/logepa/article/view/10981/6166>>. Acesso em: 12 mai. 2016.

LORANDI, R. et al. Carta de potencial à erosão laminar da parte superior da bacia do Córrego do Monjolinho (São Carlos, SP). **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 53, n. 1, p. 111-117, dez./2001. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/viewFile/203/186>>. Acesso em: 3 maio 2015.

MACHADO, C. J. S. Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 6, n. 2, jul./dez. 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/%0D/asoc/v6n2/a08v06n2.pdf>>. Acesso em: 2 abr. 2016.

MARANHÃO, N. **Sistema de indicadores para planejamento e gestão dos recursos hídricos de bacias hidrográficas**. 2007. 397 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MARQUES, J. F. Erosão do solo na Microbacia do Córrego Taquara Branca. In: HAMMES, V. S. **Julgar: percepção do impacto ambiental**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2012. p. 153-157.

MARTÍNEZ, R. Q. **Indicadores de sostenibilidad ambiental y desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas**. Santiago: CEPAL, 2001.

_____. **Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe**. Santiago: División de Estadística y Proyecciones Económicas, 2007.

_____. **Estadísticas del medio ambiente en América Latina y el Caribe: avances y perspectivas**. Santiago: CEPAL, 2005. Disponível em: <http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5609/S05629_es.pdf?sequence=1>. Acesso em: 2 fev. 2015.

MARTINI, L. C. P. et al. Avaliação da suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa: decisão multicriterial suportada em Sistemas de Informações Geográficas. **Geologia USP, Série Científica**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 41-52, jul. 2006. Disponível em: <<http://ppegeo.igc.usp.br/pdf/guspsc/v6n1/04.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2016.

MARTINS, H. F.; MARINI, C. **Um guia de governança para resultados na administração pública**. Brasília: Publix, 2010. (Coleção Publix Conhecimento).

MARTOS, H. L.; MAIA, N. B. **Indicadores Ambientais**. Sorocaba. Esalq USP. 1997. 266 p.

MATTAR NETO, J.; KRÜGER, C. M.; DZIEDZIC, M. Análise de indicadores ambientais no reservatório do Passaúna. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, p. 205-214, abr./jun. 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v14n2/a08v14n2.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2015.

MEADOWS, D. **Indicators and information systems for sustainable development: a report to the Balaton Group**. [S.l.]: The Sustainability Institute, 1998.

MEDEIROS, A. **Autocorrelação espacial**: mapas de cluster no ArcGIS. 2016. Disponível em: <<http://andersonmedeiros.com/como-fazer-mapas-de-cluster-no-arcgis/>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

MESQUITA, D. A.; ROIG, H. L. Análise de metodologias para identificação de *cluster* de acesso a documentação civil básica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...**Curitiba: INPE, 2011. p. 8748-8755. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/marte/2011/07.22.15.17?mirror=dpi.inpe.br/ban on/2003/12.10.19.30.54&metadataarepository=dpi.inpe.br/marte/2011/07.22.15.17.52>>. Acesso em: 5 abr. 2016.

MILANI, M. A.; PEREZ FILHO, A. Considerações preliminares sobre a fragilidade ambiental de terras paulistas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 10., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: UFRJ, 2003. Disponível em: <<http://www.cibergeo.org/XSBGFA/eixo3/3.3/166/166.htm>>. Acesso em: 6 mar. 2016.

MILLIGAN, G. W. Clustering validation: results and implications for applied analysis. In: ARABIE, P.; HUBERT, L. J.; DE SOETE, G. **Clustering and classification**. New Jersey: World Scientific Publication, 1996. p. 341-375.

MINAYO, M. C. S. Construção de indicadores qualitativos para avaliação de mudanças. **Revista Brasileira de Educação Médica**, Rio de Janeiro, v. 33, supl. 1, p. 83-92, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbem/v33s1/a09v33s1.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2016.

MOITA NETO, J. M. M.; MOITA, G. C. Uma Introdução à análise exploratória de dados multivariados. **Química Nova**, São Paulo, v. 21, n. 4, p. 467-469, 1998.

Disponível em:

<http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol21No4_467_v21_n4_15.pdf>.

Acesso em: 15 fev. 2016.

MONTAÑO, M. **Os Recursos hídricos e o zoneamento ambiental**: o caso do município de São Carlos (SP). 2002. 129 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MORAES, J. S.; TORRES, E. A.; KIPERSTOK, A. Aplicação da ferramenta SIG para obtenção de indicadores energéticos em edifícios. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 2008. p. 1-10.

MORETTINI, M. T. C. **Segmentação do mercado habitacional do município de São Paulo**. 2009. 133 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MURO, M. D. **Carta de zoneamento para seleção de áreas frente à instalação de aterros sanitários no município de São Carlos – SP**. 2000. 172 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

NÚCLEO DE APOIO A GESTÃO HOSPITALAR. **Manual de indicadores**

recursos humanos: NAGEH pessoas 2014. Disponível em:

<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwibz7r19NfLAhURI5AKHWHqAJUQFggqMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.cqh.org.br%2Fportal%2Fpag%2Fanexos%2Fbaixar.php%3Fp_ndoc%3D683%26p_nanexo%3D%2520455&usg=AFQjCNGPJikxv3uhQ69OeI5lc9Qjg5NwDw&sig2=u1p8NVc8blJby5JfGIKCZw>. Acesso em: mar. 2016.

NUNES, S. G. **Contribuição da análise de clusters para a identificação de diferentes fenótipos na retinopatia diabética**. 2006. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Visão) – Faculdade de Medicina, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2006.

NUNES, J. L. S. **Agrolink**: Georreferenciamento: *Softwares* (2015). Disponível em:

<<http://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/Softwares.aspx>>. Acesso em: 18 jan. 2016.

OBARA, A. T. **Valoração econômica de unidades de conservação – método de**

valoração contingente – caso de estudo: Estação Ecológica do Jataí (Luiz Antônio – São Paulo). 1999. 111 f. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1999.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT.
Using the pressure – state – response model to develop indicators of sustainability:
 OECD framework for environmental indicators. [S.l.: s.n.], 1999. Disponível em:
<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCUQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.oecd.org%2Fdataoecd%2F7%2F47%2F24993546.pdf&ei=Tv1dVY3kFYWnggSMqYCwDA&usg=AFQjCNH-JNGYTPxv1ByZT-T9jIydo9KKMQ&sig2=BUR6eP6T6pthfpnS3JTOew>. Acesso em: 21 fev. 2015.

_____. **OECD environmental indicators:** towards sustainable development. [S.l.: s.n.], 2001. Disponível em: <http://www.oecd.org/site/worldforum/33703867.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2015.

_____. **Rumo a um desenvolvimento sustentável:** indicadores ambientais. Tradução Ana Maria S. F. Teles. Salvador: Centro de Recursos Ambientais, 2002. (Série cadernos de referência ambiental, v. 9).

_____. **OECD environmental indicators:** development, measurement and use. Paris: [s.n.], 2003. Disponível em: <http://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/24993546.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2015.

OLIVATO, D.; GALLO JUNIOR, H. G. **Unidades de conservação:** conservando a vida, os bens e os serviços ambientais. São Paulo: PDA, 2008.

OLIVEIRA, C. H. **Planejamento ambiental na cidade de São Carlos (SP) com ênfase nas áreas públicas e áreas verdes:** diagnóstico e proposta. 1996. 181 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1996.

OLIVEIRA, A. M.; CUNHA, A. C. Análise de risco como medida preventiva de inundações na Amazônia: estudo de caso de enchente de 2000 em Laranjal do Jari – AP, Brasil. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, Ed. Especial SIC, p.110-118, 2015. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/cienciaenatura/article/viewFile/16224/pdf>. Acesso em: 18 abr. 2016.

OLIVEIRA, V. V.; MONTAÑO, M. A. Adoção da abordagem de empreendimentos para a gestão ambiental de cidades. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O

PLANEAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO, SUSTENTÁVEL, 4., 2010, Faro. **Anais...** Faro: [s.n.], 2010. p. 1-11. Disponível em: <http://pluris2010.civil.uminho.pt/en/congresso_actas_Tit_en.html> Acesso em: Jul. 2014.

OLIVEIRA, F. R. et al. Análise da fragmentação da paisagem da bacia hidrográfica do Alto São Bartolomeu como subsídio ao modelo Pressão – Estado – Resposta. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 17, n. 1, p. 207-234, maio 2014. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/espacoegografia/index.php/espacoegografia/article/view/319/207>>. Acesso em: 8 maio 2015.

PAIVA, C. **Dependência espacial**: setores censitários, zonas OD, distritos, sub prefeituras e etc. [S.l.]: CET/SP, 2007; [S.l.]: PUC/SP, 2007. Disponível em: <<http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/espacial.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2016.

PALVARINI, B. Guia referencial de mensuração do desempenho na administração pública. In: CONGRESSO CONSAD DE GESTÃO PÚBLICA, 3., 2010, Brasília. **Anais...** Brasília: CONSAD, 2010. Paineis 12. Disponível em: <[http://www.escoladegoverno.pr.gov.br/arquivos/File/Material_%20CONSAD/paineis_II I_congresso_consad/painel_12/guia_referencial_de_mensuracao_do_desempenho_na_administracao_publica.pdf](http://www.escoladegoverno.pr.gov.br/arquivos/File/Material_%20CONSAD/paineis_II_I_congresso_consad/painel_12/guia_referencial_de_mensuracao_do_desempenho_na_administracao_publica.pdf)>. Acesso em: 28 jan. 2016.

PANACHUKI, E. et al. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n.2, p.261-268, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v10n2/v10n2a03.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

PASSOS, H. D. B.; PIRES, M. M. Indicadores ambientais para avaliação de agroecossistemas. **Informe Gepec**, Toledo, v. 12, n. 1, p. 1-15, jan./jun. 2008. Disponível em: <http://www.researchgate.net/profile/Monica_Pires/publication/228648972_INDICADORES_AMBIENTAIS_PARA_AVALIAO_DE_AGROECOSSISTEMAS/links/53ebacef0cf250c8947ab595.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2015.

PAULA JUNIOR, D. R.; POMPERMAYER, R. S. Indicadores de sustentabilidade para análise comparativa de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, n. 6, p. 27-33, abril 2007. Disponível em: <http://www.abes-dn.org.br/publicacoes/rbciamb/PDFs/06-08_artigo_5_artigos117.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2014.

PEREIRA, L. C.; LOMBARDI NETO, F. L. **Avaliação da aptidão agrícola das terras**: proposta metodológica. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004.

PHILIPPI JUNIOR, A. et al. **Gestão ambiental municipal**: subsídios para estruturação de sistema municipal de meio ambiente. Salvador: CRA, 2004. (Série Construindo os recursos de amanhã, v. 4).

PRATA, B. A.; FREITAS, S. M. Uma Nova abordagem para a análise de agrupamentos com uma aplicação em Agronomia. In: SIMPÓSIO DE ESTATÍSTICA APLICADA À EXPERIMENTAÇÃO AGRONÔMICA, 12., 2007, Santa Maria. **Anais...**Santa Maria: 2007. p. 1-5. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/272478626_Uma_nova_abordagem_para_a_analise_de_agrupamento_com_uma_aplicacao_em_agronomia>. Acesso em: fev. 2016.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. **Cidade**: conheça São Carlos: história de São Carlos. 2015. Disponível em:
<<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/historia-da-cidade/115269-historia-de-sao-carlos.html>>. Acesso em: 27 fev. 2015.

_____. Lei nº 13. 944, de 12 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a criação de Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais - APREM no município de São Carlos e dá outras providências. Disponível em:
<http://www.saocarlos.sp.gov.br/images/stories/plano_diretor/Microsoft%20Word%20-%20lei13944.pdf>. Acesso em: mar. 2016.

PROGRAMA CIDADES SUSTENTÁVEIS. **Guia de uso do sistema de indicadores para a construção de observatórios**. São Paulo: [s.n.], 2014. Disponível em:
<<http://www.cidadessustentaveis.org.br/downloads/arquivos/guia-uso-sistema-indicadores.pdf>>. Acesso em: 8 fev. 2015

QUINTAL, G. M. C. C. **Análise de clusters aplicada ao sucesso/insucesso em Matemática**. 2006. 184 f. Dissertação (Mestrado em Matemática para o Ensino) – Departamento de Matemática e Engenharias, Universidade da Madeira, Funchal, 2006.

REIS, D. L. R. **Análise espacial da formação de agrupamentos hoteleiros em Belo Horizonte**. 2014. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geoprocessamento) – Departamento de Cartografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

RIBEIRO, A. L. **Modelo de indicadores para mensuração do desenvolvimento sustentável na Amazônia**. 2002. 280 f. Tese (Doutorado em Ciências: Desenvolvimento Socioambiental) – Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.
RIBEIRO, A. I. et al. Utilização do modelo Pressão, Estado e Resposta (PER) no Parque Municipal da Água Vermelha “João Cândio Pereira” – Sorocaba–SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 3., 2012, Goiânia.

Anais...Goiânia: IBEAS, 2012.

RODRIGUES, Z. M. R. **Sistema de indicadores e desigualdade socioambiental intraurbana de São Luís – MA**. 2010. 209 f. Tese (Doutorado em Geografia Humana) –Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

RODRIGUES, G.S.; CAMPANHOLA, C. Sistema integrado de avaliação de impacto ambiental aplicado a atividades do Novo Rural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 4, p. 445-451, abr. 2003. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/15036/1/v38n04445.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2016.

ROSA, R. Análise espacial em geografia. **Revista da ANPEGE**, Dourados, v. 7, n. 1, p. 275-289, out. 2011. Disponível em: <<http://www.anpege.org.br/revista/ojs-2.4.6/index.php/anpege08/article/download/163/RAE23>>. Acesso em: 13 jan. 2016.

ROZADOS, H. B. F. Uso de indicadores na gestão de recursos de informação. **Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, Campinas, v. 3, n.1, p. 60-76, jul./dez. 2005. Disponível em: <http://www.brapci.inf.br/_repositorio/2010/06/pdf_2637b476d7_0011207.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2015.

RUFINO, R. C. **Avaliação da qualidade ambiental do município de Tubarão (SC) através do uso de indicadores ambientais**. 2002. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

SAATY, T. L. **The Analytic hierarchy process**. New York: McGraw Hill, 1980.

SACRAMENTO, M. F.; REGO, M. J. M. A Bacia de drenagem enquanto unidade integradora nos estudos geoambientais. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6., 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: [s.n.], [2006?]. Disponível em: <<http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/sinageo/articles/325.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2015.

SANTOS, J. E. et al. **Estação Ecológica de São Carlos, Brotas – SP: análise e zoneamento ambiental**. São Carlos: Rima, 2003. v. 1.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SANTOS, S.; PINA, M. F.; CARVALHO, M. S. Os Sistemas de informações geográficas. In: PINA, M. F.; SANTOS, S. M. **Conceitos básicos de sistemas de informação geográfica e cartografia aplicados à saúde**. Brasília: OPAS, 2000. p. 13-40.

SÃO CARLOS. Prefeitura Municipal de São Carlos. Coordenadoria de Meio Ambiente. **Plano Municipal de Saneamento – São Carlos/SP**: Relatório 05 - Final. São Carlos: [s.n.], 2012.

SÃO CARLOS. Prefeitura Municipal de São Carlos. Secretaria Municipal de Habitação e Desenvolvimento Urbano. **Revisão do plano diretor de São Carlos**: plano diretor estratégico: macrozoneamento definindo o desenvolvimento da cidade. São Carlos: [s.n.], 2014. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/images/stories/pdf/Proposta%20para%20o%20Macrozoneamento.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2015.

SÃO PAULO. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi – Guaçu. **Diagnóstico da bacia hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu**: relatório zero. São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7106/relmogiseg.pdf>>. Acesso em: mar. 2015.

SÃO PAULO. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos**: 2004 / 2007 Resumo. São Paulo: DAEE, 2006.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Coordenadoria de Recursos Hídricos. **Relatório de situação dos recursos hídricos do Estado de São Paulo**. São Paulo: SSRH/CRHi, 2011.

SÃO PAULO. Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. Comitê de Bacia hidrográfica Tietê-Jacaré (CBH – TJ). **Fundamentos para cobrança pelo uso dos recursos hídricos na bacia do Tietê – Jacaré**. Araraquara, 2009. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7117/fundamentos-da-cobranca-0.pdf>>. Acesso em: mar. 2015.

SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. Departamento de Proteção da Biodiversidade. **Reserva legal**. São Paulo, 2011. Disponível em: <http://appvps6.cloudapp.net/sigam3/Repositorio/222/Documentos/Reserva_Legal.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2015.

SCANDAR NETO, W. J. **Síntese que organiza o olhar**: uma proposta para a construção e representação de indicadores de desenvolvimento sustentável e sua

aplicação para os municípios fluminenses. 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Estatística Social) – Escola Nacional de Ciências Estatísticas, Rio de Janeiro, 2006.

SCARPINELLA, G. D. **Erosão em carregadores da cultura de cana-de-açúcar: estudo de caso na bacia do Ribeirão do Feijão (SP)**. 2012. 209 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SERVIÇO SOCIAL DA INDÚSTRIA. Departamento Regional do Estado do Paraná. Observatório Regional Base de Indicadores de Sustentabilidade. **Construção e Análise de Indicadores**. Curitiba: [s.n.], 2010.

SETTI, A. A. et al. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000; [S.l.]: Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000.

SILVA, R. C. Indicadores culturais: reflexões para a construção de um modelo brasileiro. **Observatório Itaú Cultural**, São Paulo, n. 4, p. 44-58. jan./mar. 2008. Disponível em: <http://d3nv1jy4u7zmsc.cloudfront.net/wp-content/uploads/itau_pdf/000704.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2015.

SILVA, L. F. T. C. **Análise da suscetibilidade à erosão ao longo da RJ-165 (Estrada Paraty-Cunha)**. 2014. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SILVA, A.; MARTELLI, P. J. L.; FALK, J. A. A Matriz de riscos como instrumento de priorização para segurança da prática assistencial. In: SEMINÁRIO DE ACREDITAÇÃO INTERNACIONAL DA JOINT COMMISSION INTERNATIONAL (JCI), 7., 2014, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 2014. Disponível em: <<http://cbacred.org.br/noticias/2014/08/10/01.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2016.

SILVEIRA, L. L. L. **Elaboração de carta de susceptibilidade à erosão das bacias dos rios Araraquara e Cubatão – SP, escala 1:50:000**. 2002. 211 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SILVEIRA, C. T. et al. Mapeamento de declividade de vertentes: aplicação na APA de Guaratuba/ Paraná. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia/ Regional Conference on Geomorphology, 6., 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: UFG, 2006. p.6-10. Disponível em: <<http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/sinageo/articles/432.pdf>>. Acesso em: 2 mai. 2016.

SIMÕES, A. F. G. P. G. **Avaliação do desempenho ambiental e de riscos: modelo multicritério de apoio à construção do relatório do Estado do Ambiente da Agência Portuguesa do Ambiente**. 2013. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) – Instituto Técnico de Lisboa, Lisboa, 2013.

SOARES, J. J.; SILVA, D. W.; LIMA, M. I. S. Current state and projection of the probable original vegetation of the São Carlos region of São Paulo State, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 63, n. 3, p. 527 – 536, ago. 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/bjb/v63n3/a19v63n3.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2015.

SOUZA, J. H. et al. Desenvolvimento de indicadores síntese para o desempenho ambiental. **Saúde e Sociedade**, São Paulo, v. 18, n.3, p. 500-514, 2009.

SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Indicadores de sustentabilidade ambiental**. Salvador: SEI, 2006.

TAYRA, F.; RIBEIRO, H. Modelos de indicadores de sustentabilidade: síntese e avaliação crítica das principais experiências. **Saúde e Sociedade**, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 84-95, jan./abr. 2006.

TEIXEIRA FILHO, J. Tudo que parece sólido desmancha no ar: indicadores na gestão do conhecimento. **Insight Informal**, v. 53, 2002. Disponível em: <<http://www.mettodo.com.br/pdf/Indicadores%20na%20Gestao%20do%20Conhecimen%20to.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2016.

TIZ, G. J.; CUNHA, J. E. Urbanização e fragilidade a processos erosivos na cidade de Marechal Cândido Rondon – Paraná. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 32, n. 2, p. 77 – 92, mai./ago., 2014. Disponível em: <http://www.periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/viewFile/16824/pdf_19>. Acesso em: dez. 2015.

VALLE JUNIOR, R. F. **Diagnóstico de áreas de risco de erosão e conflito de uso dos solos na bacia do rio Uberaba**. 2008. 222 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2008.

VAN WOERDEN, J.; WIELER, C.; GUTIERREZ-ESPELETA, E.; GROSSHANS, R.; ABDELREHIM, A.; RAJBHANDARI, P. C. L. **IEA training manual: a training manual on integrated environmental assessment reporting**. [S.l]: UNEP/ IISD, 2009. (Training Module 4: monitoring, data and indicators). Disponível em:

<http://www.unep.org/ieacp/_res/site/File/iea-training-manual/module-4.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2015.

VELOZO, R. **Caracterização geológico-geotécnica do lixão desativado de São Carlos – SP, com auxílio de geofísica**. 2006. 177 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

VIEIRA, N. R. **Poluição do ar**: indicadores ambientais. Rio de Janeiro: E-papers, 2009.

ZANATA, J. M. et al. Análise do uso e ocupação do solonas áreas de preservação permanente da microbacia Ribeirão Bonito, apoiada em técnicas de geoprocessamento. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 2, n. 4, p.1262 – 1272, 2012.

WORLD BANK. **Expanding the measure of wealth**: indicators of environmentally sustainable development. Washington, D. C.: World Bank, 1997. (Environmentally Sustainable Development Studies and Monographs Series, no. 17).