UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Avaliação dos impactos à geodiversidade e ao patrimônio
geológico em áreas intensamente urbanizadas:
estudo aplicado à Bacia de Taubaté – SP.**

FERNANDA COYADO REVERTE

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Mineralogia e Petrologia do
Instituto de Geociências da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Doutora em Ciências.

Área de concentração:
Mineralogia Experimental e Aplicada

Orientadora:
Prof.^a Dra. Maria da Glória Motta Garcia

Coorientador:
Prof. Dr. José Brilha

São Paulo

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a) via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:
Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Coyado Reverte, Fernanda

Avaliação dos impactos à geodiversidade e ao patrimônio geológico em áreas intensamente urbanizadas: estudo aplicado à Bacia de Taubaté - SP. / Fernanda Coyado Reverte; orientador Maria da Glória Motta Garcia; coorientador José Brilha. -- São Paulo, 2020.
182 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia) -- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2020.

1. Bacia de Taubaté. 2. Patrimônio Geológico. 3. Serviços ecossistêmicos da geodiversidade. 4. Risco de degradação. I. Motta Garcia, Maria da Glória , orient. II. Brilha, José, coorient. III. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Avaliação dos impactos à geodiversidade e ao patrimônio
geológico em áreas intensamente urbanizadas:
estudo aplicado à Bacia de Taubaté-SP**

FERNANDA COYADO REVERTE

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria da Glória Motta Garcia

Coorientador: Prof. Dr. José Brilha

Tese de Doutorado

Nº 614

COMISSÃO JULGADORA

Dra. Maria da Glória Motta Garcia

Dra. Celia Regina de Gouveia Souza

Dra. Ligia Maria de Almeida Leite Ribeiro

Dra. Christine Laure Marie Bourotte

Dr. Marcos Antonio Leite do Nascimento

SÃO PAULO

2020

AGRADECIMENTOS

Ao meu companheiro Alan pelo afeto, apoio incondicional, incentivo, pela ajuda com as correções e sugestões, por me acompanhar nos trabalhos de campo e, sobretudo, por acreditar no meu potencial. Obrigada por absolutamente tudo!

À Prof.^a Dra. Maria da Glória Motta Garcia por me orientar com tanto carinho, pela confiança, dedicação, paciência e, principalmente, pelas críticas construtivas que contribuíram para meu crescimento profissional. Obrigada por me ajudar a seguir em frente.

Ao Prof. Dr. José Brilha por me receber durante o período de mobilidade acadêmica na Universidade do Minho e por aceitar coorientar este trabalho. Obrigada pelas contribuições, discussões e sugestões que colaboraram grandemente para a finalização da tese. Nessa jornada, agradeço também ao Prof. Dr. Diamantino Pereira e ao Prof. Dr. Renato Henriques por compartilharem suas experiências em aulas e trabalhos de campo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por fomentar a realização deste trabalho com as concessões das bolsas de doutorado e de mobilidade acadêmica do Programa PDSE/Processo nº 88881.135227/2016-01.

À Thais Trevisani Moura pelo empenho, dedicação e pela ótima companhia durante todos os trabalhos de campo na região da Bacia de Taubaté.

Ao Prof. Dr. Vinícius Meira por todo ensinamento e por acompanhar as atividades de campo na Rodovia dos Tamoios. Nesse ensejo, agradeço à concessionária Tamoios, em especial ao Flávio Castro (Gerência de Qualidade, Segurança, Meio Ambiente e Saúde – QSMS), pelo suporte logístico nos referidos trabalhos.

À Prof.^a Dra. Eliane Del Lama pela paciência, estímulo, ensinamentos e cordialidade.

Às professoras Dra. Denise Bacci, Dra. Christine Bourotte e Dra. Lucelene Martins por permitirem que eu vivenciasse a experiência docente como educadora do Programa de Formação de Professores. Obrigada pela troca, conversas, apoio e oportunidade.

À Vanessa Mucivuna e Rodrigo Marinangeli pelo companheirismo e amizade desde o início dessa longa jornada na universidade. Van, obrigada por me incentivar, pelas conversas, sugestões, parceria e por se fazer sempre presente quando precisei.

À Rachel Prochoroff e a D. Maria Helena por me receberem de forma tão calorosa em Braga, tornando os meus dias mais leves e menos solitários durante o doutorado sanduíche. Rachel, obrigada pela troca de conhecimento, conversas, apoio e amizade.

Aos funcionários do Instituto de Geociências, em especial, a Solange Moni, e aos professores Dr. Paulo Oliveira, Dr. Luis Eduardo Anelli, Dra. Juliana Basso e Dra. Judite Garcia, por compartilharem conhecimento sobre os fósseis da área de estudo e permitirem que eu acompanhasse as atividades de campo da disciplina de paleontologia com a turma da graduação.

Às concessionárias CCR Nova Dutra e Ecopistas, ao DER-SP, à Extrativa Santa Fé e à Aerovale por autorizarem a realização dos trabalhos de campo na região da Bacia de Taubaté.

À todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“Que os nossos esforços desafiem as impossibilidades. Lembrai-vos de que as grandes proezas da história foram conquistas daquilo que parecia impossível.”

Charles Chaplin

RESUMO

REVERTE, F.C. 2020. **Avaliação dos impactos à geodiversidade e ao patrimônio geológico em áreas intensamente urbanizadas: estudo aplicado à Bacia de Taubaté – SP.** [Tese de Doutorado], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 182p.

Localizada no extremo leste do estado de São Paulo, a Bacia de Taubaté faz parte do segmento central do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) e resulta da fase tardia de ativação tectônica da Plataforma Sul-Americana, associada à abertura do Oceano Atlântico Sul. A geodiversidade da região fornece recursos naturais que beneficiam cerca de 2,9 milhões de habitantes, e se faz excepcional em afloramentos que registram eventos importantes para a compreensão da história geológica do Vale do Paraíba. A área que corresponde à bacia encontra-se em intenso processo de urbanização, cujas ações antrópicas, associadas ao caráter frágil dos litotipos, oferecem risco de degradação ao patrimônio geológico e à oferta de bens e serviços ambientais. Somadas a esses fatores, acrescentam-se as atividades mineradoras, as quais também contribuem gradativamente para a perda da geodiversidade, além de incidirem de forma negativa na oferta dos serviços ecossistêmicos. Como forma de identificar, qualificar e sugerir propostas para colaborar com a gestão sustentável dos bens naturais e do patrimônio geológico local, foi realizado o inventário, a quantificação e a avaliação dos serviços ecossistêmicos prestados pela geodiversidade, considerando a vulnerabilidade e a fragilidade dos recursos naturais frente à expansão urbana. A metodologia adotada na realização do inventário teve início com a definição de três categorias geológicas, que nortearam a seleção de 18 geossítios representativos. Em seguida, procedeu-se à quantificação desses sítios por meio da plataforma GEOSIT. A partir dos valores obtidos para relevância científica e risco de degradação foi possível identificar as ameaças e avaliar a perda do valor científico do patrimônio geológico com base no estado de conservação dos geossítios. Para os serviços ecossistêmicos, o método adotado considerou a análise qualitativa dos aspectos abióticos, além do contexto histórico e cultural, no qual a geodiversidade se apresenta como parte fundamental na promoção do desenvolvimento econômico local. Foram identificados 53 serviços ecossistêmicos distribuídos pelos quatro tipos de funções. A relação entre a oferta e a perda dos serviços foi estabelecida por meio da avaliação do uso e ocupação do solo da área. Para isso foram elaborados dois mapas, com escala temporal de 30 anos entre eles, de modo a comparar e quantificar as transformações ocorridas na região. A integração dos dados permitiu identificar quais ações antrópicas correspondem aos principais fatores de alteração na oferta de serviços ecossistêmicos e de degradação dos geossítios. Os resultados indicaram que tanto a avaliação ecossistêmica quanto o patrimônio geológico devem ser considerados nas políticas públicas de gestão e ordenamento territorial, pois fornecem subsídios para proposição de medidas mitigatórias de impactos e de compensação ambiental, favorecendo o uso sustentável dos recursos pela sociedade e a conservação do patrimônio geológico para as futuras gerações.

Palavras-chave: Patrimônio geológico, serviços ecossistêmicos, risco de degradação, Bacia de Taubaté.

ABSTRACT

REVERTE, F.C. 2020. **Assessment of impacts on geodiversity and geoheritage in intensely urbanized areas: study applied to the Taubaté Basin - SP.** [PhD Thesis], São Paulo, Institute of Geosciences, University of São Paulo, 182p.

Located in the Eastern part of the state of São Paulo, the Taubaté Basin is part of the central segment of the Continental Rift of Southeastern Brazil (CRSB) and results from the late event of tectonic activation of the South American Platform, associated with the opening of the South Atlantic Ocean. The geodiversity of the region provides natural resources that benefit about 2.9 million inhabitants, being exceptional in outcrops that record important events for understanding the geological history of the Paraíba Valley. The area that corresponds to the basin is in an intense urbanization process, whose anthropic actions, associated with rock fragility, represents a risk of degradation to the geological heritage and to the supply of environmental goods and services. In addition to these factors, mining activities also contribute gradually to the loss of geodiversity, as well as negatively affecting the supply of ecosystem services. In order to identify, to qualify and to suggest proposals to collaborate with the sustainable management of natural resources and local geological heritage, an inventory, quantification and evaluation of ecosystem services provided by geodiversity were performed, considering the vulnerability and fragility of natural resources, due the urban growth. The methodology adopted for the inventory included the definition of three geological categories, which guided the selection of 18 representative geosites. These sites were then quantified using the GEOSIT platform, which results based on the values of relevance and risk of degradation allowed identify the threats and to evaluate losses on the scientific value of geological heritage, considering on the state of conservation of the geosites. For the ecosystem services, the method considered the evaluation of the abiotic aspects, including historical and cultural context, in which geodiversity is as a fundamental part in promoting local economic development. 53 ecosystem services were identified distributed in the four functions: regulation, support, provision and cultural. The relationship between the supply and the loss of services was established by assessing both the land use and the occupation of the area. In order to compare and to quantify the transformations that occurred in the region, two maps were confeccioned considering a 30-year gap. The integration of the data allowed identify which anthropic actions are the main responsible for the changes in the provision of ecosystem services and for the degradation of geosites. The results indicated that both ecosystem services assessment and geological heritage should be considered in public management and territorial planning policies, as they provide subsidies for proposing mitigation measures and environmental compensation, favoring the sustainable use of resources by society and conservation of geological heritage for future generations.

Keywords: Geological heritage, ecosystem services, risk of degradation, Taubaté Basin.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa e objetivos	3
1.2 Localização e acessos	5
1.3 Contexto Geológico	6
1.3.1 O Rifte Continental do Sudeste do Brasil	6
1.3.2 A Bacia de Taubaté	8
 2. BASES CONCEITUAIS	14
2.1 Panorama geral da geodiversidade	14
2.2 Serviços ecossistêmicos da geodiversidade.....	17
2.2.1 A importância da geodiversidade na oferta dos serviços ecossistêmicos	26
 3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Inventário e quantificação do patrimônio geológico	28
3.1.1 Definição das categorias geológicas	28
3.1.2 Seleção de potenciais geossítios.....	28
3.1.3 Atividades de campo	29
3.1.4 Seleção final	29
3.1.5 Avaliação quantitativa.....	30
3.2 Identificação e quantificação da perda dos serviços ecossistêmicos	31
3.2.1 Pesquisa bibliográfica:.....	31
3.2.2 Avaliação qualitativa e definição das variáveis da geodiversidade	31
3.2.3 Identificação dos serviços ecossistêmicos da geodiversidade ..	31
3.2.4 Mapeamento do crescimento urbano	32
3.2.5 Quantificação dos serviços ecossistêmicos da geodiversidade	34

4. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA: GEODIVERSIDADE, PATRIMÔNIO GEOLÓGICO E RISCO DE DEGRADAÇÃO NA BACIA DE TAUBATÉ	38
4.1 Vulnerabilidade e fragilidade.....	39
4.2 Variáveis da geodiversidade	44
4.2.1 <i>Rochas e estruturas</i>	44
4.2.2 <i>Recursos minerais</i>	45
4.2.3 <i>Fósseis</i>	46
4.2.4 <i>Formas de relevo</i>	47
4.2.5 <i>Recursos hídricos</i>	48
4.2.6 <i>Solos</i>	49
5. INVENTÁRIO DE GEOSSÍTIOS COMO INSTRUMENTO DE GESTÃO E PRESERVAÇÃO DA MEMÓRIA GEOLÓGICA: EXEMPLO DE GEOSSÍTIOS VULNERÁVEIS DA BACIA DE TAUBATÉ (SÃO PAULO, BRASIL).....	51
6. AVALIAÇÃO DA PERDA DO VALOR CIENTÍFICO DE GEOSSÍTIOS POR FATORES NATURAIS E ANTRÓPICOS: EXEMPLO APLICADO À BACIA DE TAUBATÉ – SP	86
7. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS PRESTADOS PELA GEODIVERSIDADE EM ÁREAS ALTAMENTE URBANIZADAS: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO TAUBATÉ, BRASIL	114
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	152
8.1 Inventário do patrimônio geológico.....	152
8.2 Quantificação e avaliação da perda do valor científico.....	153
8.3 Identificação e quantificação da perda dos serviços ecossistêmicos	154
8.4 Conclusões e perspectivas	155
9. REFERÊNCIAS.....	157

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo com destaque para os municípios que se encontram dentro da Bacia de Taubaté, no estado de São Paulo. Fonte: Carvalho et al. (2011).	5
Figura 2: Contexto geológico e tectônico regional do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). Fonte: Riccomini et al. (2004).	6
Figura 3: Mapa do arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté. Os compartimentos São José dos Campos e Taubaté são separados pelo Alto de Caçapava, e os compartimentos de Taubaté e de Aparecida pelo Alto de Pindamonhangaba. Fonte: Adaptado de Fernandes e Chang (2001).	9
Figura 4: Quadro tectônico e litoestratigráfico do RCSB. Letras: t - depósitos de tálus; c - depósitos coluviais; ca - depósitos colúvio aluviais; a – depósitos. Fonte: Modificado de Riccomini (1989).	10
Figura 5: Modelos esquemáticos das três fases de evolução sedimentar da Bacia de Taubaté.	12
Figura 6: Organograma da relação existente entre geodiversidade, patrimônio geológico e geoconservação. Fonte: Brilha (2016).	17
Figura 7: A) Representação geral da relação atual entre geodiversidade e biodiversidade nas abordagens de capital natural e serviços ecossistêmicos; B) Proposta de nova representação.	22
Figura 8: Régua de classificação da significância (σ).	35
Figura 9: Diagrama dos parâmetros envolvidos para estimar o risco de degradação de um geossítio	40
Figura 10: Zoneamento de mineração da região da Bacia de Taubaté. Fonte: Simi et al.(2009).	42
Figura 11: A e B) Rompimento de barragem em lagoa de mineração no município de Jacareí – SP, em 2016, com vazamento de rejeitos para o rio Paraíba do Sul....	43

Figura 12: Impactos da mineração. A) Degradação ambiental gerada pela mineração em Guararema – SP. Fonte: Mechi e Sanchez (2010); B) Desmonte hidráulico em Jacareí, às margens da Rodovia Dutra. Notar a barreira de eucaliptos plantada ao longo da rodovia para ocultar as cavas; C) Cava de extração de areia invadindo área de preservação e destruindo mata ciliar próximo ao rio Paraíba do Sul.....43

Figura 13: Exemplos de fósseis do Oligoceno encontrados na Bacia de Taubaté: A e B) Reconstituição e réplica da *Paraphysornis Brasiliensis*; C) Borboleta fóssil; D) Folha fóssil; E) *Taubatherium*, com arcada dentária no detalhe. Espécie encontrada apenas na região da bacia..... 47

Figura 14: Perfil esquemático de direção NNO – SSE da Bacia de Taubaté. Fonte IPT (1981)..... 48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos serviços ecossistêmicos realizada por Costanza et al. (1997).....	19
Tabela 2: Categorias das funções ecossistêmicas, exemplos de seus componentes, processos e serviços que podem ser gerados. Modificado de De Groot et al.(2002).	20
Tabela 3: Categorias, definição e exemplos de serviços ecossistêmicos. Adaptado de MEA (2005).	20
Tabela 4: Exemplos de benefícios proporcionados pela geodiversidade classificados de acordo com a abordagem ecossistêmica e principais divisões de cada tipo de serviço. A coluna "Beneficiários" indica se os benefícios garantem diretamente bem-estar humano (homem) ou ecossistemas de apoio (eco). A coluna "Tipo" indica se a gênese do benefício é apenas geológica (Geo) ou o resultado de processos geológicos (Bio / Geo). Fonte: Brilha et al. (2018).....	24
Tabela 5: Critérios, valores possíveis e pesos para a avaliação do valor científico (A)	30
Tabela 6: Serviços Ecossistêmicos da Geodiversidade (Brilha et al., 2018).	32
Tabela 7: Classes e interpretação para a elaboração do uso do solo.	33
Tabela 8: Critérios para classificação da Significância (σ) de alteração do meio natural causados pelas “Categorias de Uso e Ocupação do Solo” definidas para a Bacia de Taubaté.	34
Tabela 9: Exemplo da obtenção dos valores de Significância (σ).Os sinais “+” e “-” correspondem a aumento e perda, respectivamente.	35
Tabela 10: Relação entre as categorias e os serviços ecossistêmicos. Os sinais “+” e “-” correspondem a aumento e perda, respectivamente.	36
Tabela 11: Mineração de areia nos municípios do Vale do Paraíba / base 2014 (IPT, 2015).	42
Tabela 12: Principais bens minerais presentes na Bacia de Taubaté por município. (Fonte: Saad, 1990; Campanha, 1994; DNPM, 2016).....	46

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios das civilizações o conhecimento acerca do território tem sido um fator fundamental à sobrevivência dos seres humanos, condicionando a escolha dos melhores locais para a sua instalação e desenvolvimento, ou seja, aqueles favorecidos pelos elementos abióticos na natureza, cuja variedade constitui a geodiversidade.

A geodiversidade é caracterizada pelos diferentes elementos abióticos resultantes de processos intrínsecos à dinâmica do planeta. Definida por muitos autores (Sharples, 1993; 2002; Kiernan, 1994, 1997; Gray, 2004; 2018a; Stanley, 2004; Brilha, 2005; 2016), representa todos os aspectos geológicos (minerais, rochas e fósseis), geomorfológicos (formas de relevo), pedológicos e hidrológicos, incluindo suas propriedades e seus processos de gênese e transformação. Esses sistemas compõem o substrato em que a vida se estabelece, ofertando uma série de recursos ambientais essenciais à manutenção da vida na Terra. Pode-se dizer, portanto, que o desenvolvimento da biodiversidade sempre esteve condicionado aos elementos disponibilizados pela geodiversidade.

Cada vez mais a geodiversidade tem assumido um caráter patrimonial, que objetiva garantir sua conservação. Nessa perspectiva, muitos autores utilizam-se da geoconservação para levantar e reconhecer a geodiversidade de áreas relevantes na superfície do planeta, contribuindo com o avanço do conhecimento geocientífico e com sua proteção (Nascimento *et al.* 2008). Para Brilha (2016), quando essas áreas apresentam relevância do ponto de vista científico, são definidas como geossítios, enquanto aquelas com elevada beleza cênica, características didáticas e/ou turísticas, mas sem valor científico, são denominadas sítios da geodiversidade. Ainda segundo o autor, o conjunto de geossítios inventariados e caracterizados constitui o patrimônio geológico de uma dada região.

O aumento da demanda pelo uso dos produtos oriundos da geodiversidade, aliado ao processo de expansão urbana, tem ameaçado a integridade do patrimônio geológico. Por se tratar de recursos naturais não renováveis em nossa escala de tempo, a destruição desse patrimônio se constitui numa perda irreparável. Tendo em vista a necessidade de promover o uso sustentável dos elementos da geodiversidade, bem como sua manutenção na oferta de bens e serviços à população, surge um novo ramo das ciências da Terra, denominado

geoconservação. Segundo Henriques *et al.* (2011), a geoconservação tem por objetivos promover a gestão de geossítios, valorizando e conservando a parte mais relevante da geodiversidade.

Devido à importância da geodiversidade na provisão dos recursos naturais, alguns autores têm considerado a vertente geológica na classificação dos serviços ecossistêmicos (Gray, 2011, 2013; 2018b; Gordon *et al.*, 2012; Brilha *et al.*, 2018), que corresponde ao estoque de recursos naturais existentes no planeta que geram um fluxo de benefícios tangíveis e intangíveis direta e indiretamente úteis aos seres humanos (Costanza e Daly, 1992; Andrade e Romeiro, 2009).

Nesse contexto, a Avaliação Ecossistêmica do Milênio (*Millennium Ecosystem Assessment – MEA*), ocorrida entre 2001 e 2005, é considerada o primeiro grande esforço internacional para explorar as relações entre o bem-estar humano e esses serviços. No entanto, embora muito discutidas nas últimas décadas, as classificações propostas para os serviços ecossistêmicos ainda priorizam a biodiversidade, negligenciando os elementos da geodiversidade na provisão dos recursos naturais.

A Bacia de Taubaté, foco deste trabalho, está situada no sudeste do estado de São Paulo, numa área altamente urbanizada. A região possui uma abundante rede hidrográfica, representada pelo rio Paraíba do Sul e afluentes, responsável pelo abastecimento de importantes polos industriais do país e de grande parte da população local. Apresenta ainda um importante patrimônio geológico, contemplando afloramentos que registram parte da história evolutiva do estado de São Paulo (Garcia *et al.*, 2018; Reverte *et al.*, 2019), com ênfase no contexto tectônico associado à instalação e evolução do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989). Esse evento está relacionado à fase tardia de ativação da Plataforma Sul Americana, que resultou na abertura do Atlântico Sul.

Cabe ainda destacar seus aspectos geomorfológicos, decorrentes de sua localização privilegiada, entre as Serras do Mar e Mantiqueira — verdadeiros redutos da biodiversidade brasileira —, e paleontológicos, visto que a região da bacia é considerada uma das mais relevantes em ocorrências de fósseis do sudeste brasileiro (Bernardes-de-Oliveira *et al.*, 2002), conferindo ainda mais valor ao patrimônio geológico local.

Essa relevante geodiversidade torna a bacia um importante instrumento de pesquisa e ensino em virtude dos diversos afloramentos que são utilizados há anos

para estudos científicos nas mais variadas áreas do conhecimento. Muitos desses afloramentos, no entanto, encontram-se vulneráveis perante atividades antrópicas e têm sido destruídos ao longo dos anos em virtude, principalmente, do intenso crescimento urbano. Além disso, estão submetidos à ação de intemperismo severo, o que os torna ainda mais frágeis.

Diante do exposto, este trabalho surge como uma forma de suprir a lacuna existente acerca de métodos que envolvam a avaliação e caracterização de geossítios vulneráveis e dos serviços ecossistêmicos prestados pela geodiversidade em áreas de expansão urbana, de modo a fornecer subsídios para a gestão e uso dos recursos naturais. Pretende-se contribuir com a manutenção de um ecossistema sustentável e com a preservação do patrimônio geológico local às futuras gerações, apontando as adequabilidades e limitações para o uso e ocupação do solo na região da Bacia de Taubaté.

1.1 Justificativa e objetivos

O crescimento urbano corresponde a um dos principais desafios à manutenção de um meio ambiente sustentável, visto que, na maioria das vezes, ele não é realizado de forma planejada, causando grandes impactos ambientais que comprometem a integridade do patrimônio geológico, os recursos naturais e a disponibilização dos serviços ecossistêmicos.

Esse crescimento impacta de forma acentuada os recursos da Bacia de Taubaté. Por se tratar de uma bacia sedimentar, seus afloramentos estão submetidos à ação de intemperismo, o que torna parte dos elementos abióticos extremamente frágeis à ação do clima. Neste sentido, a região do Vale do Paraíba está inserida no Brasil Tropical Atlântico, uma zona influenciada pelo clima subtropical úmido o qual, aliado a outros fatores ambientais, como cobertura vegetal e geologia, favorecem uma intensa decomposição das rochas (Nimer, 1989).

Além disso, a área apresenta elevada densidade demográfica e se encontra em intensa transformação, fazendo com que a paisagem venha se modificando de forma acelerada em virtude, principalmente, de atividades antrópicas decorrentes da expansão urbana.

Nesse contexto, conhecer o meio físico e suas inter-relações com os ecossistemas é fundamental para criação de políticas públicas que minimizem os impactos do crescimento urbano, especialmente em regiões onde esse crescimento

está associado à oferta de recursos naturais, como as areias e argilominerais explorados há décadas na região da bacia. Dessa forma, a avaliação da geodiversidade fornecerá subsídios para o planejamento e ordenamento territorial, contribuindo com o desenvolvimento sustentável e o bem-estar social da população local.

Diante do exposto, a motivação principal deste trabalho surge em busca de respostas para três questões principais:

- i. Quais são os geossítios que compõem o patrimônio geológico da região e que devem ser protegidos para fins científicos e educativos?
- ii. Qual é o papel da geodiversidade local no fornecimento de bens e serviços à população e qual a influência da perda dessa geodiversidade no fornecimento desses bens e serviços?
- iii. Qual a relação entre o patrimônio geológico e a geodiversidade e como o risco de degradação afeta os geossítios?

Para responder a essas questões, os objetivos principais deste trabalho consistem em avaliar qualitativamente a geodiversidade da Bacia de Taubaté, ilustrando sua importância enquanto subtrato tanto para o desenvolvimento de atividades econômicas quanto para subsistência de todos os seres vivos que habitam a região. Os objetivos específicos do trabalho compreendem:

- i. Realização do inventário e avaliação do patrimônio geológico;
- ii. Quantificação da relevância dos geossítios priorizando o valor científico e o risco de degradação por meio da caracterização de geossítios vulneráveis;
- iii. Identificação dos serviços ecossistêmicos com base na avaliação qualitativa da geodiversidade e proposição de método para quantificação desses serviços;

- iv. Integração dos dados com foco na vulnerabilidade e fragilidade dos recursos naturais, de modo a contribuir com o desenvolvimento sustentável e gestão territorial.

1.2 Localização e acessos

A Bacia de Taubaté está localizada do estado de São Paulo numa região que abrange onze municípios do chamado Vale do Paraíba Paulista, que juntos somam pouco mais de 1,9 milhões de habitantes (IBGE, 2019). São eles: Jacareí, São José dos Campos, Caçapava, Taubaté, Tremembé, Pindamonhangaba, Roseira, Aparecida, Guaratinguetá, Lorena e Cruzeiro (Fig. 1).

Figura 1: Localização da área de estudo com destaque para os municípios que se encontram dentro da Bacia de Taubaté, no estado de São Paulo. Fonte: Carvalho et al. (2011).

As principais vias de acesso da região, a partir de São Paulo, são as rodovias Ayrton Senna (antiga Trabalhadores — SP-70), a Presidente Dutra (BR-116), além daquelas que, a partir dessas, atendem às cidades do litoral norte paulista e outras adjacentes. A região do município de Taubaté é servida ainda pela antiga Estrada de Ferro Central do Brasil (EFCB), que liga as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, importantes polos comerciais e industriais do país.

1.3 Contexto Geológico

1.3.1 O Rifte Continental do Sudeste do Brasil

O Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) corresponde a uma feição tectônica de idade cenozoica que ocorre entre as cidades de Curitiba, no Paraná, e Barra de São João, no Rio de Janeiro. Apresenta-se como uma faixa estreita e deprimida, alongada na direção NE, possuindo extensão de pouco mais de 900 km. Segue a linha de costa atual, da qual dista em média 70 km, alcançando o Oceano Atlântico em seu segmento ocidental e na sua terminação nordeste (Riccomini, 1989) (Fig. 2).

Figura 2: Contexto geológico e tectônico regional do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB).
Fonte: Riccomini et al. (2004).

O RCSB pode ser dividido em três segmentos: O primeiro, denominado segmento ocidental, engloba a Bacia de Curitiba, as formações Alexandra e Pariqueira-Açu e os grábens de Guaraqueçaba, Cananeia e Sete Barras; o segmento central acolhe as bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda, assim como os depósitos das regiões de Bonfim (localizada a sudeste da Bacia de

Taubaté) e Cafundó (entre as bacias de Resende e Volta Redonda); e, por fim, o segmento oriental compreende as bacias do Macacu, Itaboraí e o Gráben de Barra de São João (Riccomini *et al.*, 2004).

Instalado em meio a granitoides neoproterozoicos da Faixa Ribeira, o RCSB se desenvolveu sobre rochas metamórficas de baixo a médio grau, com idades variando de arqueanas a neoproterozoicas. O embasamento pré-cambriano da região é constituído por rochas metamórficas e ígneas, referíveis ao Ciclo Brasileiro. Ocorrem também intrusões de diabásio, comumente sob a forma de diques e soleiras, datados do Cretáceo Inferior.

Os traços gerais da tectônica e estratigrafia da região do RCSB, compreendida entre as cidades de São Paulo e Volta Redonda, em uma extensão de cerca de 350 km de comprimento, foram descritos por diversos autores (Riccomini, 1989; Fernandes, 1993; Salvador, 1994; Ferrari, 2001; Riccomini *et al.*, 2004; Zalán e Oliveira, 2005; Moura, 2015). Riccomini (1989), com base principalmente na análise cinemática de estruturas rúpteis e de fácies sedimentares, amparado em dados mineralógicos, palinológicos, geocronológicos e geomorfológicos, estabeleceu a seguinte sequência de seis eventos para a área estudada:

- i. Paleógeno (Eoceno-Oligoceno): formação da depressão original (hemi-graben), contínua na porção analisada, como resultado do campo de esforços extensionais de direção NNW-SSE;
- ii. Neógeno: transcorrência sinistral de direção E-W, com extensão NW-SE e, localmente, compressão NE-SW.
- iii. Plioceno a Pleistoceno Inferior: implantação de novo sistema fluvial meandrante (Formação Pindamonhangaba) na porção central da Bacia de Taubaté, em condições provavelmente quentes e úmidas;
- iv. Pleistoceno Superior: inicialmente fase de estabilidade tectônica com a deposição de sedimentos colúvio-aluviais;
- v. Holoceno: nova extensão WNW-ESE (E-W), afetando depósitos de baixos terraços ligados à evolução da rede de drenagem do rio Paraíba do Sul; e

- vi. Atual: campo de tensões indicando compressão E-W, sugestivo de nova mudança no regime de esforços.

1.3.2 A Bacia de Taubaté

Posicionada no segmento central do RCSB, corresponde a uma bacia assimétrica formada internamente por regiões deprimidas, representadas pelas sub-bacias de Jacareí, Eugênio de Melo, Taubaté e Pindamonhangaba, e separadas por zonas elevadas, denominadas altos do rio Putins, Caçapava, rio Una e Aparecida. Os sedimentos que preenchem essa depressão são de origem tipicamente continental e de idade cenozoica (Eoceno-recente), com profundidade máxima estimada em torno de 850 metros (Marques, 1990; Vidal *et al.*, 2004). Constitui-se numa bacia do tipo rifte intracontinental, relacionada à tectônica distensiva de idade paleógena, e sua forma alongada está condicionada por descontinuidades antigas de direção geral ENE do embasamento, que favoreceram uma tectônica ressurgente (Fernandes, 1993; Fernandes e Chang, 2001).

A sedimentação da Bacia de Taubaté é *sin*-tectônica, com depósitos de granulometria grossa nas bordas falhadas da bacia, e arenosos e/ou argilosos na parte central, esses relacionados a ambiente flúvio-lacustre (Chang *et al.*, 1989; Riccomini, 1989). Assenta-se sobre rochas ígneas e metamórficas do Cinturão de Dobramentos Ribeira, datadas desde o Paleoproterozoico até o Neoproterozoico (Hasui e Ponçano, 1978) e seu arcabouço é formado por semigrábens separados por zonas de transferências, com depocentros invertidos, em típica geometria de bacia do tipo rifte (Vidal *et al.*, 2004).

Estas zonas são representadas pelos altos estruturais de Caçapava e Pindamonhangaba, picos onde se encontram rochas do embasamento e coberturas sedimentares, respectivamente, que subdividiram a bacia em três compartimentos alongados, de direção NE, nomeados de sudoeste para nordeste (Fernandes e Chang, 2001) (Fig. 3):

- i. Compartimento São José dos Campos: correspondente à porção menos profunda da bacia;

- ii. Compartimento Taubaté: que chega a alcançar 600 metros de espessura de sedimentos; e
- iii. Compartimento Aparecida: com as maiores espessuras sedimentares, atingindo cerca de 800 metros.

Figura 3: Mapa do arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté. Os compartimentos São José dos Campos e Taubaté são separados pelo Alto de Caçapava, e os compartimentos de Taubaté e de Aparecida pelo Alto de Pindamonhangaba. Fonte: Adaptado de Fernandes e Chang (2001).

De acordo com Fernandes e Chang (2001), o compartimento São José dos Campos representa um hemigráben com assoalho inclinado para NW, controlado pela falha de São José, apresentando deposição sedimentar máxima de 300 metros de espessura. O compartimento Taubaté é controlado pela Falha de Quiririm e também corresponde a um hemigráben, com cerca de 600 metros de espessura máxima de sedimentos. O compartimento Aparecida, por sua vez, localizado na porção sudoeste da bacia, é representado por um gráben assimétrico com mergulho para NW controlado pela Falha do Ribeirão da Serra, delimitado pelas Falhas de Piedade e do Ronco, ao longo da borda noroeste, e pela Falha de Aparecida na borda sul. Segundo Riccomini (1989), na porção central deste compartimento,

próximo à Falha de Piedade, a espessura do preenchimento sedimentar atinge 800 metros.

O substrato da Bacia de Taubaté é composto por milonito-gnaisses, blastomilonitos, milonitos, gnaisses bandados, gnaisses graníticos, xistos, quartzitos, anfibolitos, granitos, pegmatitos, aplitos e migmatitos, sendo representado, predominantemente, por rochas do Terreno Embu (Riccomini, 1989; Salvador, 1994). Associa-se ao embasamento um sistema de falhas transcorrentes de direção E a ENE, sendo que até o Ciclo Brasileiro permaneciam ativas (Hasui e Ponçano, 1978; Salvador, 1994).

Segundo Riccomini (1989), os sedimentos cenozoicos que preenchem as bacias do Rifte Continental do Sudeste do Brasil pertencem a sistemas deposicionais diferenciados, subdividindo-se, da base para o topo, em três sequências principais: Grupo Taubaté, constituído pelas Formações Resende, Tremembé e São Paulo, cujo preenchimento foi *sin*-tectônico ao rifte; Formação Itaquaquecetuba; e Formação Pindamonhangaba, com depósitos aluvionais e coluvionais associados. As duas últimas tiveram deposição posterior à tectônica diástrófica, conforme segue (Fig. 4):

Figura 4: Quadro tectônico e litoestratigráfico do RCSB. Letras: t - depósitos de tálus; c - depósitos coluviais; ca - depósitos colúvio aluviais; a - depósitos. Fonte: Modificado de Riccomini (1989).

- Formação Resende: corresponde a um sistema de leques aluviais de rios entrelaçados, intimamente vinculados às bordas da bacia (Vidal *et al.*, 2004). As fácies medianas e distais apresentam conglomerados com seixos, blocos e matacões imersos em matriz lamítica a arenosa, com predominância de arenitos com granulometria grossa. Riccomini (1989) descreve a presença de diamictitos arenosos com seixos de quartzo e fragmentos líticos do embasamento nas fácies proximais.
- Formação Tremembé: originalmente definida por Almeida (1958), apresenta-se inserida à Formação Resende e se desenvolve, predominantemente, na porção central da Bacia de Taubaté. Corresponde a um sistema lacustre do tipo *playa-lake* (Riccomini, 1989), de idade oligocênica, representado por pacotes de argilitos verdes maciços, com intercalações tabulares e contínuas de calcários dolomíticos (Salvador, 1994), ritmitos de folhelhos, dolomitos e arenitos (Riccomini, 1989, Riccomini *et al.*, 2005). A maior ocorrência de fósseis da bacia encontra-se depositada nessa formação.
- Formação São Paulo: unidade do topo do Grupo Taubaté, restrita apenas a porção sudoeste da Bacia de Taubaté, corresponde a depósitos sedimentares relacionados a sistemas fluviais meandrantos, sobrepostos aos leques aluviais. As fácies principais são compostas por arenitos grossos e conglomeráticos, siltitos e argilitos laminados e arenitos médios e grossos gradando para sedimentos mais finos.
- Formação Itaquaquecetuba: representada por um sistema fluvial entrelaçado, encontra-se alojada sobre rochas do embasamento pré-cambriano tanto em contatos erosivos quanto tectônicos, compreendendo arenitos médios a conglomeráticos. Essa formação é mais comum na Bacia de São Paulo, contudo, ocorre em regiões localizadas na Bacia de Taubaté, normalmente sobre o embasamento.
- Formação Pindamonhangaba: corresponde a um sistema fluvial meandrante, de idade neógena, desenvolvido principalmente nas porções central e sudoeste da Bacia de Taubaté. Recobre, de modo discordante,

os depósitos da Formação Tremembé, Resende e São Paulo. No geral, a unidade apresenta um nível conglomerático basal, seguido de arenitos mais grossos no topo, ascende para siltitos maciços e estratificados (Salvador, 1994).

- Sedimentos Quaternários: são depósitos de sedimentos de diferentes sistemas deposicionais, tais como depósitos de tálus, coluviões, colúvio-aluvionais e aluviais.

Os sedimentos associados ao Grupo Taubaté, representados pelas Formações Resende, Tremembé e São Paulo, e sedimentos da Formação Pindamonhangaba, que ocorre na porção central da bacia e se encontra em contato discordante com os sedimentos do Grupo Taubaté, encontram-se preservados. Riccomini (1989) corrobora que ocorrem derrames de rochas alcalinas, datadas do Cretáceo Superior ao início do Neógeno, entre a base e intercalações aos sedimentos do Grupo Taubaté.

Apesar de algumas datações indicarem idades eocênicas para os primeiros sedimentos depositados, dados bioestratigráficos situam toda a sua coluna sedimentar dentro do intervalo Oligoceno, o que impossibilita um detalhamento da evolução sedimentar da referida Bacia (Riccomini *et al.*, 1987). De modo a facilitar a compreensão dessa evolução, os autores utilizaram a “geologia de eventos”, definindo três fases de evolução sedimentar para a área (Fig. 5).

Figura 5: Modelos esquemáticos das três fases de evolução sedimentar da Bacia de Taubaté. 1) embasamento; 2) conglomerados e diamictitos; 3) inunditos e lamitos; 4) folhelhos lacustres; e 5) arenitos fluviais. Fonte: Riccomini *et al* (1987).

De acordo com a Fig. 5, Riccomini *et al.*, (1987) descrevem a evolução sedimentar da Bacia de Taubaté da seguinte maneira:

- Fase I: ocorre o preenchimento inicial do rifte decorrente da sedimentação de leques aluviais e lamitos arenosos associados a uma planície de rios entrelaçados da Formação Resende, onde a maior subsidência e aporte sedimentar se processam na borda norte da bacia.
- Fase II: consiste na instalação de um sistema lacustre (Formação Tremembé) que se expande até um nível de lago máximo, que corresponde a camadas de folhelhos betuminosos. Nessa fase ocorreram cheias esporádicas que propiciaram a deposição de corpos de inunditos nas bordas do lago e argilas maciças floculadas, intercaladas aos folhelhos no centro, além de um evento de ressecamento de grande intensidade, marcado pela presença de um paleossolo.
- Fase III: corresponde à implantação de um sistema fluvial (representados pelas Formações São Paulo e Pindamonhangaba), que persistiu até o Holoceno, no Quaternário.

2. BASES CONCEITUAIS

2.1 Panorama geral da geodiversidade

O conceito relativo à geodiversidade começou a ser utilizado pela comunidade científica no início da década de 1990, em especial por geólogos e geomorfólogos, para descrever a variedade do meio abiótico (Gray, 2004). Desde então, diversos autores têm proposto diferentes definições para o termo, considerando a importância dos seus elementos na construção das paisagens e processos geológicos relevantes à história do planeta. Gray (2013) elenca algumas dessas definições em sua obra (Dixon, 1996; Johannson *et al.*, 2000; Stanley, 2001; 2004; Sharples, 2002; Gray, 2004; Kozłowski, 2004; Burek e Prosser, 2008; dentre outros), na qual o autor redefine o termo como sendo:

“a variedade natural (diversidade) de elementos geológicos (rochas, minerais, fósseis), geomorfológicos (formas de relevo, topografia, processos físicos), do solo e hidrológicos. Isso inclui suas assembleias, estruturas, sistemas e contribuições para as paisagens” (Gray, 2013, p.12).

Em termos gerais, a geodiversidade compreende, portanto, o conjunto de fenômenos e processos intrínsecos à dinâmica da Terra que originam os componentes necessários à manutenção da vida, como minerais, rochas, fósseis, solos e formas de relevo. Dessa forma, pode-se inferir que a existência da biodiversidade está condicionada à geodiversidade, uma vez que esta favoreceu o desenvolvimento dos seres vivos ao disponibilizar todos os recursos essenciais para a sustentação da vida na Terra, tais como alimentos e abrigo, proporcionando plenas condições de subsistência e evolução de todas as espécies.

A espécie humana é extremamente dependente dos elementos da geodiversidade e tem exaurido cada vez mais seus recursos, utilizando-os na produção de materiais tecnológicos (aparelhos eletrônicos, automóveis, na indústria), em edificações, pavimentação, como alimento, dentre outras aplicações. Esse uso, quando mal gerenciado, pode causar danos irreversíveis ao meio ambiente e possível esgotamento dos recursos naturais, não renováveis na escala de tempo da humanidade.

Por esse motivo, uma das vertentes associadas aos aspectos da geodiversidade está relacionada à gestão e conservação dos elementos abióticos da natureza por meio da geoconservação (Henriques *et al.*, 2011), que envolve o uso sustentável dos recursos naturais e a conservação de parte relevante da geodiversidade, ou seja, dos locais que apresentam algum valor. Nesse sentido, Brilha (2016) argumenta que as ocorrências que possuem relevância do ponto de vista científico são definidas como geossítios; para aquelas sem valor científico, mas ainda assim com interesses estético, educativo e/ou turístico, o autor sugere o uso do termo sítio de geodiversidade. Cabe ainda ressaltar que ao conjunto de geossítios inventariados numa dada região, atribui-se o nome de patrimônio geológico (Brilha, 2005).

Para Gray (2004), a geoconservação precisa ser integrada à gestão de conservação da biodiversidade para que ela possa ocorrer de forma mais efetiva, e não ser referenciada apenas como um ramo independente da conservação da natureza. O autor justifica que a geodiversidade precisa ser conservada quando existe algum valor atribuído a determinado local de interesse geológico somado a alguma ameaça, especialmente se essa ameaça resulta de atividade antrópica.

Nesse escopo, como forma de fundamentar a necessidade da conservação dos elementos abióticos da natureza, alguns autores começaram a pensar em definições para os valores da geodiversidade. Um dos primeiros trabalhos envolvendo essa temática foi o de Gray (2004), onde o autor, após uma compilação de trabalhos que envolviam apenas componentes bióticos da natureza, definiu seis valores, a saber:

- Valor intrínseco: considerado subjetivo, é o valor atribuído à geodiversidade pelo simples fato dela existir, independentemente dos benefícios que pode trazer ao ser humano;
- Valor cultural: se manifesta nas inúmeras relações existentes entre a sociedade e os elementos abióticos da natureza, incluindo artefatos arqueológicos e históricos fabricados com materiais geológicos, bem como mitos e outras explicações com forte expressão mística ou religiosa associadas a aspectos geológicos;
- Valor estético: pode corresponder a qualquer objeto, feição ou estrutura de cunho geológico, variando desde minerais até as grandes formas de

relevo, acrescidas de informações que permitam interpretar e contextualizar o objeto no âmbito da geologia;

- Valor econômico: associado a elementos da geodiversidade, tais como rochas, minerais, sedimentos, fósseis e água subterrânea, que podem ter aproveitamento econômico, quer na perspectiva tradicional de recursos geológicos e energéticos que são minerados, como na perspectiva de um aproveitamento turístico;
- Valor funcional: representa a importância dos elementos da geodiversidade *in situ* como suporte para a provisão de recursos ao ser humano (rochas que armazenam água subterrânea e locais propícios para instalação de usinas hidrelétricas, por exemplo), assim como substrato para sustentação dos sistemas físicos e ecológicos da superfície da Terra, favorecendo a sobrevivência de todas as espécies;
- Valor científico: corresponde ao uso da geodiversidade para estudo tanto de forma conceitual, que permite identificar e interpretar os processos que envolvem a dinâmica do planeta, quanto no caráter aplicado, ao reconhecer áreas de potenciais riscos geológicos (vulcanismo, terremotos, deslizamentos), refletindo na melhoria das relações de convivência entre as pessoas e a geodiversidade.

Essa proposta definida por Gray (2004), muito utilizada em todo o mundo, possibilitou o desenvolvimento de novas abordagens para a valoração e conservação da geodiversidade. Brilha (2016), por exemplo, engloba a geoconservação em todos os aspectos da geodiversidade com valor, afirmando que existem muitos elementos que não apresentam valor científico, mas possuem importância para uso turístico, educativo e/ou cultural, por exemplo, devendo também, por isso, serem conservados (Fig. 6).

Figura 6: Organograma da relação existente entre geodiversidade, patrimônio geológico e geoconservação. Fonte: Brilha (2016).

2.2 Serviços ecossistêmicos da geodiversidade

A crescente transformação do meio urbano pela sociedade tem demandado, cada vez mais, o uso dos recursos naturais oferecidos pelo planeta, influenciando, às vezes de forma irreversível, a dinâmica dos ecossistemas. O conceito de ecossistema foi definido por Tasley (1935) para designar um conjunto de comunidades compostas por elementos bióticos e abióticos que ocupam um determinado local e interagem entre si e com o meio ambiente, constituindo um sistema estável e equilibrado.

A dinâmica de um ecossistema autossuficiente atua no fornecimento de bens naturais que são usufruídos pela sociedade. No entanto, muitas atividades antrópicas, como o uso e ocupação do solo de forma inadequada, emissão de poluentes e desmatamento, por exemplo, geram impactos negativos aos ecossistemas, afetando o fluxo dos serviços, fundamentais à manutenção da vida na Terra.

Desde a década de 1960, quando King (1966) e Helliwell (1969) apresentaram o conceito de benefícios naturais, tem havido um crescente interesse da comunidade científica para entender e descrever o funcionamento dos ecossistemas e como eles influenciam no bem-estar da população (Ehrlich e Money, 1983; De Groot *et al.*, 2002; Kremen, 2005; MEA, 2005). No entanto, foi somente na

década de 1990 que esse conceito passou a ter um viés econômico, designado por capital natural (Costanza e Daly, 1992; Costanza *et al.*, 1997; Gómez-Baggethum *et al.*, 2010; Bennett *et al.*, 2014).

Costanza *et al.* (1997) se referem ao termo “capital” como sendo os estoques de materiais ou informações existentes num determinado período que geram fluxos de serviços. Nesse sentido, o capital natural pode ser considerado como o estoque de recursos naturais existentes que geram um fluxo de benefícios tangíveis e intangíveis direta e indiretamente úteis aos seres humanos (Costanza e Daly, 1992; Andrade e Romeiro, 2009).

Nesse contexto, os conceitos relacionados aos serviços ecossistêmicos têm sido discutidos por diversos autores ao longo das últimas décadas (Costanza *et al.*, 1997; Daily, 1997; De Groot *et al.*, 2002; Daily e Farley, 2004; Kremen, 2005; Boyd e Banzhaf, 2007; Brown *et al.*, 2007; Fisher *et al.*, 2009; Farley, 2012, dentre outros). De forma geral, entende-se por serviços ecossistêmicos as funções, estruturas, processos naturais ou outros componentes dos ecossistemas que fornecem, direta ou indiretamente, saúde e bem-estar para a população.

A Avaliação Ecossistêmica do Milênio (*Millennium Ecosystem Assessment – MEA*), ocorrida entre 2001 e 2005, com o intuito de avaliar as consequências das mudanças nos ecossistemas sobre o bem-estar humano, propôs uma definição para os serviços ecossistêmicos que é a mais utilizada atualmente. Esse conceito foi baseado nas definições de Costanza *et al.* (1997), no que se refere à inclusão dos ecossistemas como fontes de serviços ecossistêmicos, e de Daily (1997), para a inclusão do termo “serviços”, abrangendo os benefícios tangíveis e intangíveis que as pessoas obtêm dos ecossistemas.

Muitos autores têm sugerido diferentes classificações para os serviços ecossistêmicos (De Groot, 1992; De Groot *et al.*, 2000; Farber *et al.*, 2006). Costanza *et al.* (1997) foram os primeiros a propor uma classificação, ainda muito utilizada internacionalmente. Os autores descrevem 17 categorias com base nas funções ecossistêmicas (Tabela 1). De Groot *et al.* (2002) apresentaram uma relação das principais funções e seus componentes, processos, bens e serviços ecossistêmicos, dividindo as funções em quatro grandes categorias: regulação; habitat; produção; e informação (Tabela 2). A MEA, por sua vez, também classificou os serviços ecossistêmicos em quatro categorias: provisão; regulação; culturais; e suporte (Tabela 3).

Tabela 1: Classificação dos serviços ecossistêmicos realizada por Costanza et al. (1997).

Serviços Ecossistêmicos	Função Ecossistêmica	Exemplos
Regulação de Gases	Regulação da composição química atmosférica	Balanço de CO ₂ /O ₂ , O ₃ para proteção UVB e níveis de SO ₂
Regulação do Clima	Regulação de temperatura global, precipitação e outros processos climáticos de mediação biológica em nível local ou global	Regulação de GEE, produção de DMS influenciando a formação de nuvens
Regulação de Eventos Climáticos	Resistência e resiliência dos ecossistemas para minimizar alterações ambientais	Proteção contra tempestades, controle de enchentes, resiliência a secas e outras respostas dos habitats às variações ambientais, devido principalmente à integridade estrutural da vegetação
Regulação da Água	Regulação do fluxo hidrológico	Provisão de água para uso na agricultura, processos industriais ou transportes
Suprimento de Água	Retenção e armazenamento de água no ambiente	Provisionamento de água por bacias hidrográficas, reservatórios e aquíferos
Controle de Erosão e Retenção de Sedimento	Retenção de solo nos ecossistemas	Prevenção da perda de solo por vento, escoamento ou outros processos de remoção. Armazenamento de sedimentos finos em lagos e áreas úmidas
Formação e Estruturação de Solos	Processo de formação e estruturação de solos	Intemperismo de rocha e acúmulo de matéria orgânica
Ciclagem de Nutrientes	Armazenamento, ciclagem interna, processamento de nutrientes	Fixação de nitrogênio, fósforo e outros elementos
Tratamento do Lixo	Recuperação de nutrientes, remoção ou decomposição de excesso de bactérias em nutrientes e outros compostos	Tratamento de resíduos, controle de poluição e desintoxicação
Polinização	Trocas genéticas	Disponibilização de polinizadores para a reprodução de espécies vegetais
Controle Biológico	Regulação morfodinâmica de espécies	Predadores naturais são vitais para controle de espécies-presas, redução de herbívoros por predadores de topo de cadeia
Refúgios	Habitats de populações residentes ou migratórias	Ninhais, habitats regionais para espécies colhidas ou caçadas localmente
Produção de Alimentos	Parte da taxa de produção primária da base alimentar	Produção de peixes, grãos, carne, frutos, decorrentes de caça, coleta, pesca ou agricultura de subsistência
Matéria-prima	Parte da taxa de produção primária de matérias básicas	Madeira, combustível ou alimento para gado
Recursos Genéticos	Fonte de materiais e produtos biológicos	Medicamentos, produtos para ciência, manipulação genética para variedades de plantas resistentes a patógenos, espécies ornamentais
Recreação	Provisão de oportunidades para atividades recreativas	Ecoturismo, pesca esportiva e outras atividades recreacionais ao ar livre
Cultural	Provisão de oportunidades para usos não comerciais	Valor estético, artístico, educacional e espiritual dos ecossistemas

Tabela 2: Categorias das funções ecossistêmicas, exemplos de seus componentes, processos e serviços que podem ser gerados. Modificado de De Groot et al.(2002).

Funções	Conceito	Exemplos de Funções	Exemplos de Serviços relacionados
Regulação	Manutenção dos processos ecológicos essenciais e do sistema de suporte vital	<ul style="list-style-type: none"> – Regulação de gases – Regulação do clima – Regulação da água – Formação do Solo 	<ul style="list-style-type: none"> – Manutenção da qualidade do ar e da água; – Prevenção de inundações; – Proteção contra tempestades; – Drenagem e irrigação natural
Habitat	São os espaços adequados para a sobrevivência da flora e da fauna e manutenção da diversidade biológica e genética	<ul style="list-style-type: none"> – Função de Refúgio – Função de Berçário 	<ul style="list-style-type: none"> – Manutenção de espécies exploradas comercialmente
Produção	Relacionadas ao suprimento dos recursos naturais	<ul style="list-style-type: none"> – Alimento – Matéria-Prima – Recursos Genéticos – Recursos Medicinais – Recursos Ornamentais 	<ul style="list-style-type: none"> – Combustível e energia – Forragem e fertilizantes – Medicamentos e produtos farmacêuticos – Recursos para artesanato
Informação	Aptidão do ecossistema para o desenvolvimento cognitivo	<ul style="list-style-type: none"> – Informação Estética – Recreação – Espiritual – Histórica – Cultural e Artística – Ciência e Educação 	<ul style="list-style-type: none"> – Natureza como motivo em livros, filmes, pinturas, folclore, símbolos nacionais, arquitetura, propaganda. – Natureza para religião e valor histórico patrimonial dos ecossistemas – Educação Ambiental – Uso da natureza para conhecimento científico.

Tabela 3: Categorias, definição e exemplos de serviços ecossistêmicos. Adaptado de MEA (2005).

Categoria	Definição	Exemplos	
Suporte	Necessários para a produção de todos os outros serviços dos ecossistemas	<ul style="list-style-type: none"> – Formação do solo – Produção primária 	<ul style="list-style-type: none"> – Ciclos de nutrientes
Provisão	Produtos obtidos dos ecossistemas	<ul style="list-style-type: none"> – Alimentos – Água potável – Fibras 	<ul style="list-style-type: none"> – Combustível – Bioquímicos – Recursos genéticos
Regulação	Benefícios obtidos pela regulação dos processos dos ecossistemas	<ul style="list-style-type: none"> – Regulação do clima – Regulação das enfermidades 	<ul style="list-style-type: none"> – Regulação da água – Purificação da água
Culturais	Benefícios intangíveis obtidos dos ecossistemas	<ul style="list-style-type: none"> – Espirituais e religiosos – Recreativos e ecoturísticos – Estéticos e inspiradores; – Herança cultural 	<ul style="list-style-type: none"> – Educacionais – Sensação de pertencimento

Com base nos quadros elencados, é possível constatar que as classificações propostas não se aplicam de fato a todo o contexto que envolve os serviços ecossistêmicos, tal como valoração monetária dos referidos serviços, a gestão ambiental e o manejo da paisagem, por exemplo. Além disso, não há menção a nenhum recurso de origem geológica, que são fundamentais à sustentação e evolução de todos os ecossistemas.

Por esse motivo, Gray (2013) adaptou a definição proposta pela Avaliação Ecossistêmica do Milênio (*Millennium Ecosystem Assessment – MEA* – elencada no Tabela 8) e passou a enfatizar a vertente geológica considerando o valor intrínseco da geodiversidade, referido anteriormente. Além disso, incluiu uma quinta categoria à classificação da MEA, que o autor chamou de “Serviços do Conhecimento”. Assim, essa nova classificação, denominada primeiramente como “Serviços Geossistêmicos” (Gray, 2011), passou a ser conhecida por “Serviços Ecossistêmicos Abióticos” (Gray, 2013; Gray *et al.*, 2013).

- Serviços de Regulação: compreendem processos intrínsecos à dinâmica do planeta;
- Serviços de Suporte: representa os recursos disponibilizados pela geodiversidade e que são utilizados como substrato ao desenvolvimento de atividades dos seres vivos;
- Serviços de Provisão: corresponde aos produtos da geodiversidade que são utilizados pela sociedade direta ou indiretamente, normalmente associados a valor monetário;
- Serviços Culturais: compreende a relação entre a sociedade e algum aspecto abiótico do ambiente;
- Serviços do Conhecimento: se refere à utilização da geodiversidade para ensino e divulgação do conhecimento geocientífico.

Gray (2018b) descreve algumas propostas para que a abordagem ecossistêmica avalie a geodiversidade e a biodiversidade como sendo iguais, ou

seja, enfatizando que ambas contribuem igualmente com o bem-estar da sociedade (Fig. 7). O autor menciona algumas iniciativas de países que consideram os recursos abióticos e bióticos na mesma proporção para as políticas públicas de conservação, como ocorreu com a Austrália, por meio da Carta do Patrimônio Natural da Austrália.

Figura 7: A) Representação geral da relação atual entre geodiversidade e biodiversidade nas abordagens de capital natural e serviços ecossistêmicos; B) Proposta de nova representação. Fonte: Gray (2018b).

Outro exemplo dessa igualdade de tratamento se refere às iniciativas da UNESCO, que adota critérios relativos a elementos abióticos e bióticos para avaliação do patrimônio natural. A seleção de sítios que podem compor a lista de Patrimônio Mundial da UNESCO baseia-se, dentre outros, na identificação do valor universal excepcional a partir de, pelo menos, um dos dez critérios estabelecidos¹.

Dentre os dez critérios, quatro são relativos a elementos naturais, quer da geodiversidade como também da biodiversidade:

- Critério VII: conter fenômenos naturais superlativos ou áreas de excepcional beleza natural e importância estética;
- Critério VIII: ser exemplos notáveis que representem os principais estágios da história da Terra, incluindo o registro da vida, processos geológicos

¹ A descrição dos dez critérios encontra-se disponível em <https://whc.unesco.org/en/criteria/>

significativos em andamento no desenvolvimento de formas de relevo ou características geomórficas ou fisiográficas significativas;

- Critério IX: ser exemplos notáveis que representem significativos processos ecológicos e biológicos em andamento na evolução e desenvolvimento de ecossistemas terrestres, de água doce, costeiros e marinhos e comunidades de plantas e animais; e
- Critério X: conter os *habitats* naturais mais importantes e significativos para a conservação *in situ* da diversidade biológica, incluindo aqueles que contêm espécies ameaçadas de notável valor universal do ponto de vista da ciência ou da conservação.

Brilha *et al.* (2018) trouxeram uma nova classificação aos benefícios disponibilizados pela geodiversidade com foco no uso sustentável dos recursos naturais dentro de uma abordagem ecossistêmica descrita em propostas consolidadas (MEA, 2005; TEEB, 2010; Haines-Young e Potschin, 2018). Para cada serviço — regulação, suporte, provisão e cultural —, os autores propuseram um conjunto de bens e processos cuja soma corresponde a 18 parâmetros. Além disso, consideraram os “Serviços de Conhecimento” propostos por Gray (2013) como um subitem do grupo “Serviços Culturais” (Tabela 4). Todos esses parâmetros buscam ilustrar a inter-relação existente entre natureza, geodiversidade e sociedade, enfatizando sua importância no âmbito do provimento dos recursos como fator determinante na qualidade da vida de todos os seres vivos que usufruem desses bens naturais.

A identificação e quantificação da perda dos serviços ecossistêmicos prestados pela Bacia de Taubaté foram baseados na proposta de Brilha *et al.* (2018), considerando os quatro serviços ecossistêmicos descritos pelos autores.

Tabela 4: Exemplos de benefícios proporcionados pela geodiversidade classificados de acordo com a abordagem ecossistêmica e principais divisões de cada tipo de serviço. A coluna "Beneficiários" indica se os benefícios garantem diretamente bem-estar humano (homem) ou ecossistemas de apoio (eco). A coluna "Tipo" indica se a gênese do benefício é apenas geológica (Geo) ou o resultado de processos geológicos (Bio / Geo). Fonte: Brilha et al. (2018).

Serviços Ecossistêmicos	Divisão	Benefícios	Beneficiários	Tipo	
Regulação Condições que permitem a existência da vida e da sociedade moderna	Atmosfera	Circulação dinâmica Química atmosférica Qualidade do ar e regulação do clima Ciclo da água	Ecossistemas / Homem	Bio/Geo	
	Geosfera e Hidrosfera	Ciclo das rochas, da água, do carbono e outros ciclos biogeoquímicos Sequestro de carbono Armazenamento e regulação do clima Controle de erosão do solo			
		Regulação de desastres naturais	Homem		
		Regulação da qualidade da água			
	Suporte Das condições de vida e desenvolvimento social	Solo	Intemperismo das rochas e desenvolvimento do solo para agricultura e silvicultura Fornecimento de habitat	Ecossistemas / Homem	Bio/Geo
		Água	Suporte de vida		
			Diversidade de <i>habitats</i>	Ecossistemas	
Transporte			Homem		
Rochas e formas de relevo		Fornecimento de <i>habitats</i> e estabelecimento de corredores ecológicos	Ecossistemas	Geo	
		Plataforma desenvolvimento urbano e obras de infraestrutura	Homem		
Substrato rochoso e suas formas		Enterros e armazenamento	Ecossistemas		
	Fornecimento de <i>habitat</i>				

...Continuação

	Nutrientes	Nutrientes inorgânicos essenciais à vida	Ecossistemas /	Bio/Geo
	Bebidas e alimentos	Água doce e água mineral salinizada	Homem	Geo
Provisão Recursos renováveis e não renováveis, fundamentais para a vida e sociedade	Água	Uso agrícola, industrial e doméstico		
	Material de construção	Pedras ornamentais e de construção Cimento e agregados, Aço Vidro Veículos, computadores, <i>smartphones</i> , eletrodomésticos		
	Minerais metálicos e industriais	Baterias Fertilizantes, produtos farmacêuticos Cerâmica, plásticos, refratários, papel Próteses, implantes, placas cirúrgicas e parafusos Petróleo e gás natural		
	Recursos Energéticos	Carvão Urânio Calor geotérmico Hidrelétricas, marés		
	Produtos Ornamentais	Pedras preciosas, joias (ouro, prata, platina)		
Culturais Contribuição do meio físico para o desenvolvimento de atividades culturais	Bem-estar e saúde	Hidroterapia (spas) Inspiração artística Paisagens naturais para saúde física e mental	Homem	Geo
	Recreação	Atividades turísticas (trilhas para pedestres, mirantes, cavernas, etc.) Esporte (escalada)		Bio/Geo
	História da Humanidade	Locais sagrados e históricos Uso de pedra em monumentos e outros edifícios		
	Conhecimento	História e evolução da Terra Origem e evolução da vida Paleoclimatos e paleoambientes		

2.2.1 A importância da geodiversidade na oferta dos serviços ecossistêmicos

Conforme relatado, a geodiversidade é fundamental na vida dos seres vivos, especialmente o homem. Ela determina o cotidiano das pessoas, influenciando a vida social e econômica da população.

No entanto, a alta demanda pelos serviços prestados pela geodiversidade tem comprometido cada vez mais a manutenção de um ambiente sustentável. Atividades antrópicas sem o devido planejamento, como a exploração dos recursos geológicos, construção civil, gestão desordenada de bacias hidrográficas, erosão associada ao desmatamento, dentre outras, se configuram em sérias ameaças ao meio ambiente.

Nesse sentido, é fundamental reconhecer e valorar a geodiversidade como capital natural (Gray *et al.*, 2013), de forma a promover a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Além disso, em uma perspectiva socioeconômica e ambiental, o potencial e a fragilidade dos recursos naturais devem ser considerados quando se trata de planejamento urbano. Para isso, é necessário compreender as características físicas e sociais de um determinado território para que sejam propostos mecanismos de gestão adequados à sua realidade.

Segundo Ross (1993), é preciso fazer um inventário dos solos, relevo, rochas e minerais, clima, flora e fauna, a fim de avaliar o potencial de uso desses recursos como suporte à vida, considerando a fragilidade da natureza de modo a não comprometer a funcionalidade intrínseca existente entre componentes físicos e bióticos. Em outras palavras, é importante conhecer a geodiversidade de um determinado local para promover o uso do solo sem interferir na disponibilização dos serviços ecossistêmicos aos seres vivos que lá habitam.

No âmbito dos serviços de conhecimento, que também contribuem com a valorização dos recursos, inúmeros trabalhos têm sido publicados com foco na identificação e descrição do patrimônio geológico em diversas regiões do país, tanto em áreas naturais e turísticas (Mansur, 2010; Pereira, 2010; Prochoroff, 2014; Reverte, 2014; Reverte e Garcia, 2016a; b; Reverte e Garcia, 2017; Mucivuna *et al.*, 2016; Arruda *et al.*, 2017a; b; Garcia *et al.*, 2019) como também aplicadas ao meio urbano (Piekarz e Liccardo, 2007; Liccardo *et al.*, 2012; Del Lama *et al.*, 2015; Nascimento *et al.*, 2016; Queiroz e Garcia, 2017; Moura *et al.*, 2017; Garcia *et al.*, 2018).

Pesquisas que reflitam, de fato, a aplicação e valoração da geodiversidade em

uma abordagem ecossistêmica ainda são relativamente escassas. No Brasil, Mochiutti *et al.* (2011), por exemplo, classificaram os valores da geodiversidade com base em Gray (2004) como forma de implantar medidas para a geoconservação da região de Piraí da Serra, no estado do Paraná.

No âmbito dos serviços prestados pela geodiversidade, Silva e Nascimento (2016) identificaram os valores e os referidos serviços aplicados ao município de Natal, no estado do Rio Grande do Norte. No mesmo estado, Silva (2018) fez um levantamento dos serviços aplicados ao patrimônio geológico do projeto Geoparque Seridó, indicando a função e potencialidade de uso dos elementos naturais identificados em cada um dos ecossistemas existentes na área estudada. Recentemente, Garcia (2019) sistematizou o patrimônio geológico de todo o litoral norte do estado de São Paulo identificando, além dos ecossistemas e dos serviços da geodiversidade, os impactos e ameaças que comprometem a disponibilidade e a manutenção desses serviços para a população local.

Os resultados dessas pesquisas podem ser apresentados aos órgãos competentes para propor ações voltadas ao desenvolvimento de políticas públicas com foco no uso e gerenciamento adequado do território, contribuindo, inclusive, com a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Além disso, esses trabalhos ajudam a promover o ensino e divulgação das geociências ao descreverem locais que se constituem em registros importantes à compreensão da história da Terra, corroborando sua importância enquanto serviço de conhecimento prestado pela geodiversidade. No âmbito do geoturismo, eles podem servir como referência para o desenvolvimento de ações que potencializem a economia desses locais por meio do turismo, gerando uma série de benefícios à população local.

A abordagem dos serviços ecossistêmicos deve servir, portanto, como suporte na avaliação da geodiversidade, atribuindo valor aos recursos disponibilizados pela natureza como forma de quantificar e qualificar esses serviços, primordiais à manutenção de um ecossistema saudável.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Inventário e quantificação do patrimônio geológico

A realização de um inventário sistemático envolve critérios que variam de acordo com o contexto geológico da área que se pretende inventariar. Deve-se considerar o levantamento de dados geológicos, organização e classificação desses dados, identificação, descrição e quantificação dos geossítios.

O principal objetivo do inventário aqui apresentado foi descrever locais geologicamente representativos, selecionados por se constituírem em locais-chave para a compreensão da história geológica da Bacia de Taubaté. O método utilizado foi adaptado de Brilha (2016) e envolveu as seguintes etapas:

3.1.1 Definição das categorias geológicas

Por meio de pesquisa bibliográfica, foram definidas categorias geológicas de modo a direcionar a seleção de geossítios. Tais categorias foram escolhidas com base no contexto geológico da Bacia de Taubaté, visando à compreensão dos aspectos relevantes da geodiversidade de acordo com a história e evolução geológica e geomorfológica da região.

3.1.2 Seleção de potenciais geossítios

Após a definição das categorias geológicas, iniciaram-se as pesquisas voltadas à seleção de potenciais geossítios. Nessa etapa, buscou-se priorizar locais que já haviam sido descritos na literatura da área de estudo. Foram realizadas consultas tanto à bibliografia publicada sobre a área, incluindo pontos descritos no inventário do estado de São Paulo (Garcia *et al.*, 2018), quanto a pesquisadores que trabalharam ou estudaram no local, visto que estes profissionais possuem referências que podem qualificar e justificar a delimitação de um geossítio.

3.1.3 Atividades de campo

A partir da listagem obtida na etapa anterior, procedeu-se à investigação dos potenciais geossítios através de trabalho de campo para averiguar as informações obtidas previamente na síntese bibliográfica, além de visitar novos sítios indicados por pesquisadores.

Todos os sítios foram fotografados, descritos e analisados no âmbito do valor científico, incluindo informações sobre a relevância e integridade, fundamentais à avaliação do geossítio. Além desses fatores, levou-se em consideração o estágio de fragilidade atual das áreas visitadas, visto que os afloramentos da região se encontram submetidos a elevado grau de intemperismo.

Ademais, toda a região do Vale do Paraíba está em crescente transformação, o que torna os locais de interesse geológico ainda mais vulneráveis em decorrência de atividades antrópicas.

3.1.4 Seleção final

Com base nas etapas anteriores, foi possível definir os geossítios que compõem o inventário da bacia. Alguns potenciais geossítios foram excluídos com base nos critérios a seguir:

- i. Pontos descritos em trabalhos científicos sobre a região, mas que, ao serem georreferenciados, se localizavam fora da área de estudo e que por esse motivo não foram visitados;
- ii. Pontos cujas feições não são mais visíveis, por conta da atuação do intemperismo severo que atinge a região;
- iii. Pontos que não existem mais, pois foram destruídos para construção de infraestrutura ao Vale do Paraíba, como duplicação de rodovias e demais empreendimentos imobiliários;
- iv. Pontos que não correspondem aos melhores exemplos na área de estudo (baixa representatividade);

- v. Pontos localizados em áreas privadas onde não foi possível obter autorização para realizar trabalho de campo.

3.1.5 Avaliação quantitativa

A quantificação dos geossítios foi realizada através do GEOSSIT, uma plataforma *online* utilizada para registro e quantificação de locais de interesse geológico, constituindo um banco de dados para futura integração de um inventário nacional (Rocha *et al.*, 2016). O sistema é disponibilizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

A proposta do GEOSSIT se baseou no método de Brilha (2016) para quantificar o valor científico, o risco de degradação e o potencial de uso turístico e educativo dos geossítios, somado ao método de Garcia-Cortés e Carcavilla-Urquí (2009) para definir as prioridades de proteção dos locais submetidos à avaliação.

Assim, neste trabalho foram considerados apenas os critérios associados ao valor científico, que apresenta sete parâmetros, e ao risco de degradação, com cinco parâmetros (Tabela 5).

Tabela 5: Critérios, valores possíveis e pesos para a avaliação do valor científico (A) e Risco de degradação (B).

CRITÉRIO A: VALOR CIENTÍFICO (VC)		VALOR	PESO (%)
A1	Representatividade	0, 1, 2 ou 4	30
A2	Local-tipo		20
A3	Conhecimento científico		5
A4	Integridade		15
A5	Diversidade geológica		5
A6	Raridade		15
A7	Limitações de uso		10
TOTAL:			100
CRITÉRIO B: RISCO DE DEGRADAÇÃO (RD)		VALOR	PESO (%)
B1	Deterioração de elementos geológicos	0, 1, 2, 3 ou 4	35
B2	Proximidade a áreas/atividades com potencial para causar degradação		20
B3	Proteção Legal		20
B4	Acessibilidade		15
B5	Diversidade populacional		10
TOTAL:			100

3.2 Identificação e quantificação da perda dos serviços ecossistêmicos

Para avaliar a perda dos serviços ecossistêmicos, foi necessário interpretar como o crescimento urbano tem afetado a oferta dos serviços na região na bacia. Para isso, procedeu-se às seguintes etapas:

3.2.1 Pesquisa bibliográfica:

Consistiu em levantamento bibliográfico específico aos serviços ecossistêmicos, considerando uma abordagem geral, com foco na biodiversidade e nos aspectos históricos e culturais, e também um contexto aplicado à geodiversidade local, com o intuito de avaliar e descrever os recursos abióticos da Bacia de Taubaté para posterior avaliação qualitativa da geodiversidade.

3.2.2 Avaliação qualitativa e definição das variáveis da geodiversidade

Por meio da descrição dos recursos abióticos, foram definidos seis temas para classificação da geodiversidade da bacia. Posteriormente, baseado no trabalho de Schrodt *et al.* (2019), foi adotado o termo Variáveis da Geodiversidade (do inglês *Essential Geodiversity Variables* - EGV), classificadas em: i) rochas e estruturas; ii) recursos minerais; iii) fósseis; iv) formas de relevo; v) recursos hídricos; e vi) solos. Essas variáveis serviram como suporte para a identificação dos serviços ecossistêmicos.

3.2.3 Identificação dos serviços ecossistêmicos da geodiversidade

A partir da avaliação qualitativa das variáveis propostas na etapa anterior, foram identificados os serviços ecossistêmicos prestados pela geodiversidade considerando a proposta de Brilha *et al.* (2018), demonstrando como os elementos abióticos interagem com a biodiversidade e juntos promovem a sustentabilidade dos ecossistemas (Tabela 6).

Tabela 6: Serviços Ecossistêmicos da Geodiversidade (Brilha et al., 2018).

SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS	DIVISÃO
REGULAÇÃO Condições que permitem a existência da vida e da sociedade moderna	R1. Atmosfera
	R2. Geosfera
	R3. Hidrosfera
SUPORTE Das condições de vida e desenvolvimento social	S1. Solos
	S2. Água
	S3. Superfície rochosa e formas de relevo
	S4. Substrato e formações rochosas
PROVISIONAMENTO Dos recursos renováveis e não renováveis, fundamentais para a vida e a sociedade	P1. Nutrientes
	P2. Alimento e bebida
	P3. Água
	P4. Materiais para construção
	P5. Minerais industriais e metálicos
	P6. Recursos energéticos
	P7. Produtos ornamentais
CULTURAL Contribuição do ambiente físico para o desenvolvimento de atividades culturais	C1. Bem estar e saúde
	C2. Recreação
	C3. História da humanidade
	C4. Conhecimento

3.2.4 Mapeamento do crescimento urbano

Através da análise temporal de imagens de satélite obtidas no *Google Earth*®, foram elaborados dois mapas de uso e ocupação do solo de épocas distintas, anos de 1986 e 2016, respectivamente, visto que dentre as imagens disponíveis, esses dois períodos apresentavam melhor nitidez para interpretação e reconhecimento dos padrões de uso da área. O intuito de usar um intervalo de tempo era avaliar o aumento dos impactos ambientais associados ao crescimento urbano na região da bacia e como isso pode ameaçar a geodiversidade local, interferindo no fluxo dos serviços ecossistêmicos.

Os mapas de uso do solo da Bacia de Taubaté foram elaborados a partir de técnicas de análise espacial por vetorização manual utilizando o *software Quantum Gis*®. As duas imagens foram georreferenciadas e vetorizadas por classes de usos, classificados com base na observação dos padrões de uso e ocupação do solo, que permitiu a delimitação de polígonos de todas as áreas urbanas identificadas na região de estudo. Denominadas “Categorias de Uso e Ocupação do Solo”, estas áreas foram classificadas em: vegetação nativa, extração mineral, ocupação urbana, silvicultura e agropecuária (Tabela 7).

Tabela 7: Classes e interpretação para a elaboração do uso do solo.

CATEGORIAS DE USO	DESCRIÇÃO	EXEMPLOS DAS IMAGENS ANALISADAS
Extração Mineral	Áreas onde ocorrem extração de recursos minerais em margens de rios e/ou em rochas
Agropecuária	Áreas onde ocorrem atividades de agricultura (cultivo de plantas) e pecuária (criação de animais)
Vegetação Nativa ²	Áreas de vegetação nativa (Mata Atlântica)
Silvicultura ³	Monocultura de eucaliptos
Ocupação Urbana	Aglomerado de edificações de uso habitacional, comercial, de serviços ou segunda residência.

Em seguida, com a integração dos dois mapas, foi possível estabelecer parâmetros para comparação e análise das imagens, possibilitando a quantificação do crescimento urbano da região, realizada através do cálculo das áreas dos polígonos por meio da ferramenta “Calculadora de Campo” do *Quantum Gis*®.

² A Mata Atlântica, devido a sua biodiversidade, aparece na imagem de satélite com uma textura heterogênea e sem continuidade.

³ A silvicultura, por se tratar do cultivo de uma única espécie florestal, apresenta homogeneidade na imagem, seguindo um padrão de plantio com espaçamento entre as árvores, ou acompanhando as curvas de nível do terreno local.

3.2.5 Quantificação dos serviços ecossistêmicos da geodiversidade

Considerando a proposta de Brilha *et al.* (2018) para a definição dos serviços ecossistêmicos, foi proposto um método para a quantificação da perda dos serviços frente às alterações do meio natural causada pelas “Categorias de Uso e Ocupação do Solo” definidas na etapa anterior.

Adaptado de Longo e Rodrigues (2017), o método foi dividido em três fases:

i. Definição do valor de Significância (σ):

Primeiramente, foi definida a *Significância* (σ) de alteração do meio natural causada pelas “Categorias de Uso e Ocupação do Solo” com base nos três parâmetros estabelecidos na Tabela 8 a seguir. A cada classe de parâmetros, nomeados, em ordem, como Abrangência, Magnitude e Reversibilidade, foi atribuído um valor que varia de um a três.

Tabela 8: Critérios para classificação da Significância (σ) de alteração do meio natural causados pelas “Categorias de Uso e Ocupação do Solo” definidas para a Bacia de Taubaté.

PARÂMETRO		CLASSIFICAÇÃO		
Nome	Descrição	Classe	Valor	Descrição
Abrangência	Tamanho da área impactada	Local	1	Alterações locais e limitadas
		Regional	2	Alterações generalizadas, com influência no entorno
Magnitude	Intensidade de possíveis alterações	Pequena	1	Pequenas alterações
		Média	2	Alterações significativas
		Grande	3	Alterações muito significativas
Reversibilidade	Capacidade de recuperação do que foi afetado	Totalmente reversível	1	As condições iniciais podem ser totalmente restauradas
		Parcialmente reversível	2	As alterações podem ser interrompidas, evitando danos adicionais
		Irreversível	3	Não é possível interromper as alterações ou restaurar as condições iniciais

A *Significância* (σ) corresponde à soma dos valores de cada classe de parâmetro — Abrangência, Magnitude e Reversibilidade — com valor mínimo de três e máximo de oito (Fig. 8).

<i>Significância</i> (σ)					
Baixa		Média		Alta	
3	4	5	6	7	8

Figura 8: Régua de classificação da significância (σ).

Associando os dados da Tabela 8 à régua de *Significância* (σ), foi possível obter o valor de *Significância* (σ) para cada uma das “Categorias de Uso e Ocupação do Solo”, classificando-as em “Baixa, Média ou Alta”, conforme exemplificado na Tabela 9.

Tabela 9: Exemplo da obtenção dos valores de *Significância* (σ). Os sinais “+” e “-” correspondem a aumento e perda, respectivamente.

CATEGORIAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	ABRANGÊNCIA	MAGNITUDE	REVERSIBILIDADE	SIGNIFICÂNCIA (σ)
	Local (1) Regional (2)	Pequena (1) Média (2) Grande (3)	Totalmente Reversível (1) Parcialmente Reversível (2) Irreversível (3)	Baixa (3–4) Média (5–6) Alta (7–8)
(-) Vegetação Nativa	1	2	2	5
(+) Extração Mineral	2	3	2	7

Os valores 1, 2 e 3, obtidos da Tabela 8, foram preenchidos com base no conhecimento prévio da área de estudo. Por exemplo, para a categoria "Extração Mineral", considerou-se a "Abrangência" como "Regional" (2), visto que as áreas de mineração estão distribuídas por toda a bacia; a "Magnitude" do impacto causado pela mineração na região foi considerada "Grande" (3), já que ocorre de forma mal planejada e tem causado danos ambientais em toda a região; e o processo de extração mineral pode ser "Parcialmente Reversível" (2), já que essas atividades podem ser planejadas de forma a não prejudicar ainda mais o meio ambiente.

A soma $2 + 3 + 2 = 7$ e representa o valor de *Significância* (σ) para a categoria em questão, considerada “Alta” neste estudo.

Do ponto de vista estatístico, a divisão da *Significância* (σ) em três partes (baixa, média ou alta) permite identificar como esses parâmetros são representativos

no contexto da quantificação. A escolha de valores positivos inteiros para a classificação resulta do fato de os dados serem *ordinais qualitativos* (ou *categóricos*) (James *et al*, 2013), consistentes com as respectivas descrições feitas na Tabela 8.

Além disso, para evitar resultados tendenciosos, não foi considerado nenhum parâmetro igual a zero, visto que os cálculos posteriores serão baseados em multiplicações.

ii. Relação entre as “Categorias de Uso e Ocupação do Solo” e os serviços ecossistêmicos:

Foi feita a correlação entre as “Categorias de Uso e Ocupação do Solo” e os 18 serviços ecossistêmicos da geodiversidade descritos em Brilha *et al.*, (2018), ilustrados anteriormente na Tabela 6.

A título de exemplificação, apresentaremos um modelo de correlação se utilizando apenas dos serviços de regulação, considerando suas três divisões, e das cinco “Categorias de Uso e Ocupação do Solo”, conforme segue (Tabela 10).

Três valores foram estabelecidos para o preenchimento da tabela, correspondendo a:

- 1: quando o serviço ecossistêmico não tem relação relevante com a categoria avaliada;
- 2: quando há uma relação indireta; e
- 3: quando há uma relação direta.

Cabe ressaltar que o preenchimento dessa tabela é subjetivo e deve ser feito com base em conhecimento prévio da área avaliada.

Tabela 10: Relação entre as categorias e os serviços ecossistêmicos. Os sinais “+” e “-” correspondem a aumento e perda, respectivamente.

SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS		CATEGORIAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO				
		(-) Vegetação Nativa	(+) Extração Mineral	(+) Ocupação Urbana	(+) Silvicultura	(-) Agropecuária
REGULAÇÃO	R1. Atmosfera	3	2	3	3	2
	R2. Geosfera	1	3	3	1	2
	R3. Hidrosfera	3	2	3	3	2

iii. Determinação dos valores de *Significância Relativa* (σ_{Rel}) e *Significância por Grupo* (σ_{Grupo}):

A partir dos dados obtidos nas Tabelas 9 e 10, foi possível determinar os valores de *Significância Relativa* (σ_{Rel}) a cada um dos 18 serviços ecossistêmicos descritos em Brilha *et al.*, (2018), que permitiu quantificar a perda desses serviços frente às alterações ocorridas no uso das cinco “Categorias de Uso e Ocupação do Solo”.

Foram também quantificados os valores da *Significância por Grupo* (σ_{Grupo}) de serviços ecossistêmicos, que corresponde às alterações causadas pelas “Categorias de Uso e Ocupação do Solo” ao conjunto dos serviços estabelecidos (regulação, suporte, provisão e cultural).

A descrição completa e os resultados da quantificação da perda dos serviços ecossistêmicos foram descritos em forma de artigo e encontram-se integralmente disponíveis no capítulo 7.

4. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA: GEODIVERSIDADE, PATRIMÔNIO GEOLÓGICO E RISCO DE DEGRADAÇÃO NA BACIA DE TAUBATÉ

A ideia de conservação da natureza tem sido, historicamente, representada como a necessidade de conservar a biodiversidade, com pouca participação dos elementos abióticos da Terra, recursos em geral considerados como ilimitados. No entanto, o que tem se observado é que a crescente demanda por recursos naturais tem ameaçado cada vez mais a integridade da geodiversidade, causando, muitas vezes, danos irreversíveis ao meio ambiente, como contaminação de água e solo, essenciais à vida. Por esse motivo, o despertar da consciência ambiental por parte da população tem ganhado destaque, sendo veiculadas nas mais variadas mídias a necessidade de se conservar o meio ambiente para as futuras gerações.

Estudos científicos pautados na problemática do esgotamento dos bens naturais têm demonstrado que a maior causa da diminuição dos recursos é consequência direta de atividade humana. Isso porque o pensamento de que a Terra seria uma fonte inesgotável de recursos, sobretudo nos dois últimos séculos, fomentou o consumo dos bens naturais de forma insustentável. A partir da década de 1970, no entanto, a temática da sustentabilidade se tornou cada vez mais presente. Segundo Nascimento (2012), muitos governos se mobilizaram para a criação de agências que se ocupassem da questão ambiental, como os Estados Unidos, que criaram em 1970 a *Environmental Protection Agency* (EPA), e o Brasil, com a criação da Secretaria Especial do Meio Ambiente (Sema), em 1973.

Nesse contexto, a Conferência de Estocolmo, ocorrida na Suécia em 1972, reuniu diversos chefes de estado e representou um importante marco para a questão ambiental. Também conhecida como a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, o evento foi o primeiro grande esforço organizado pela Organização das Nações Unidas (ONU) para tratar de temas associados à degradação do meio ambiente, contribuindo para a reformulação de políticas públicas com foco na preservação ambiental (Machado, 2005). Assim, a ideia de “Conservação” passou a ter lugar central nas discussões envolvendo exploração de recursos da biodiversidade e da geodiversidade, fundamentais para a manutenção das condições que servem de suporte à sobrevivência dos seres vivos.

Em termos gerais, o conceito de conservação implica no uso racional dos recursos naturais de modo sustentável pelo ser humano, promovendo a gestão atual

desses bens de forma a garantir seu potencial de uso às gerações futuras. Cabe destacar que conservar é diferente de preservar, visto que a preservação possui um sentido mais restrito, indicando a ação de proteger um ecossistema ou determinado recurso sem utilizá-lo, mesmo que racionalmente ou de modo planejado, evitando qualquer tipo de degradação.

Pensando na conservação de parte da geodiversidade da Bacia de Taubaté é necessário contextualizar a inter-relação existente entre os recursos naturais identificados e o meio em que se inserem. Para isso, devem-se considerar as características físicas e potenciais ameaças para avaliar o risco de degradação perante a vulnerabilidade e a fragilidade a que estão submetidos os elementos da geodiversidade, de modo a identificar o que pode ou não ser conservado.

Com base nesses fatos, este capítulo tem como objetivo contextualizar a situação dos elementos da geodiversidade e do patrimônio geológico na região estudada face ao risco de degradação ao qual estão submetidos. A vulnerabilidade perante as ações antrópicas foi fator decisivo para a avaliação da geodiversidade e dos serviços ecossistêmicos ofertados pelos elementos abióticos existentes na região. A fragilidade desses elementos à ação do intemperismo também foi considerada. Em ambos os casos, optou-se por trabalhar com as variáveis da geodiversidade identificadas na bacia (Schrodt, *et al.*, 2019) e que serão descritas posteriormente.

4.1 Vulnerabilidade e fragilidade

A região da Bacia de Taubaté representa parte importante da história geológica do sudeste brasileiro. Contudo, sua riqueza geológica vem se perdendo gradativamente em virtude da extrema fragilidade natural de suas rochas e da vulnerabilidade a que estão submetidas, afetadas principalmente por atividades antrópicas decorrentes da expansão urbana.

O crescimento urbano demanda obras de infraestrutura que têm sido cada vez mais frequentes na região, muitas vezes sem o devido planejamento. Essa expansão foi potencializada com a inauguração da Rodovia Presidente Dutra em meados de 1950. O Eixo-Dutra, por interligar os principais polos econômicos do país — São Paulo e Rio de Janeiro — é considerado um elemento estruturador do espaço urbano-regional do Vale do Paraíba Paulista, influenciando fortemente o

desenvolvimento econômico e o aumento demográfico dos municípios adjacentes (Andrade *et al.*, 2019).

Com o desenvolvimento econômico, aumentam os riscos de degradação do patrimônio geológico. Nesse contexto, atividades antrópicas configuram umas das principais ameaças aos geossítios, como corroboram García-Ortiz *et al.* (2014). Para as autoras, o risco de degradação de um geossítio está associado a fatores intrínsecos e/ou antrópicos, cujos danos decorrem da fragilidade ou vulnerabilidade apresentada pelo local (Fig. 9).

Figura 9: Diagrama dos parâmetros envolvidos para estimar o risco de degradação de um geossítio
Fonte: García-Ortiz *et al* (2014).

Na região da bacia, o patrimônio geológico tem sido destruído para dar lugar a estradas, edificações e demais estruturas necessárias ao bem-estar da população (exemplos encontram-se disponíveis no capítulo 5). Dessa forma, atividades antrópicas têm afetado de maneira significativa a geodiversidade local, as quais, além de terem causado a destruição de muitos potenciais geossítios, originaram severos impactos aos recursos naturais, como a contaminação do rio Paraíba do Sul, o qual é poluído diariamente, principalmente, por lixo doméstico. Esses

impactos são comuns em processos de urbanização mal planejados.

Danos ambientais que prejudicam a fauna, a flora e a oferta dos recursos também são comuns em alguns empreendimentos, como a construção do Aerovale, o aeroporto localizado no município de Caçapava, que havia sido embargada pelo Ministério Público em 2015, retomando suas atividades em novembro de 2018. A promotoria alegou que na época houve ausência de verificação de impacto ambiental, e obras indevidas foram realizadas prejudicando nascentes e cursos d'água, além da supressão de vegetação em área de proteção permanente sem o devido licenciamento ambiental⁴.

Outro agravante que incide na área de estudo se refere à extração de areia e argila. O baixo custo de exploração e a proximidade de grandes centros consumidores tornam a exploração dessas areias e argilominerais um negócio bastante atraente em toda a área da bacia. Esse material é utilizado principalmente na construção civil e por indústrias de fertilizantes (SMA, 2008), cuja demanda tem aumentado cada vez mais com a urbanização. Isso representa um grave fator de risco tanto ao meio ambiente quanto à geodiversidade, visto que pode acarretar em impactos ambientais irreversíveis.

Nesse contexto, a Lei nº 7.803 (BRASIL, 1989), Instituída pelo Código Florestal de 1989, configura as várzeas dos rios brasileiros como Áreas de Proteção Permanente (APP). No entanto, grande parte das cavas de extração de areia — algumas ainda em atividade — estão situadas em tais áreas, configurando ameaça permanente ao rio Paraíba do Sul.

Embora o início das atividades de mineração remonte à década de 1970, o modelo de exploração pelo sistema de cavas ao longo do Paraíba do Sul se intensificou a partir da década de 1990 (Fig. 10). Segundo dados do relatório de Ordenamento Territorial Geomineiro (OTGM) do ano de 2014, disponibilizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2015), os principais produtores de areia da região do Vale do Paraíba correspondem aos municípios de Tremembé, Taubaté, Pindamonhangaba, Caçapava e Jacareí (Tabela 11).

⁴ Disponível em:

http://www.mpsp.mp.br/portal/pls/portal/!PORTAL.wwpob_page.show?_docname=2558194.PDF

Figura 10: Zoneamento de mineração da região da Bacia de Taubaté. Fonte: Simi et al.(2009).

Tabela 11: Mineração de areia nos municípios do Vale do Paraíba / base 2014 (IPT, 2015).

MUNICÍPIOS	PRODUÇÃO ANUAL ESTIMADA (toneladas)	POPULAÇÃO (IBGE, 2014)	CONSUMO ANUAL ESTIMADO
Aparecida	720.000	36.184	79.605
Caçapava	2.430,00	90.426	198.937
Cruzeiro	90.000	80.749	177.648
Guaratinguetá	180.000	118.378	260.432
Jacareí	3.420,000	224.826	494.617
Lorena	360.000	86.764	190.881
Pindamonhangaba	1.980,000	158.864	359.501
Roseira	1.080,000	10.257	22.565
São José dos Campos	Não produz	681.086	1.498.389
Taubaté	1.890,000	299.423	658.731
Tremembé	1.710,000	44.399	97.678

Outro dano ambiental significativo se refere ao rompimento de barragens de mineração. Uma delas ocorreu em 2016 na cidade de Jacareí – SP, e resultou no lançamento de rejeitos no rio Paraíba do Sul, causando transtornos para moradores de São José dos Campos, Taubaté e Pindamonhangaba, que ficaram dias sem abastecimento de água (Fig. 11A e B). Além de acidentes, muitas empresas de mineração, após encerrarem suas atividades em determinada área, não promovem a recuperação do terreno conforme havia sido previsto antes da licença de exploração, deixando essas áreas extremamente degradadas (Fig. 12A, B e C).

Figura 11: A e B) Rompimento de barragem em lagoa de mineração no município de Jacareí – SP, em 2016, com vazamento de rejeitos para o rio Paraíba do Sul.

Figura 12: Impactos da mineração. A) Degradação ambiental gerada pela mineração em Guararema – SP. Fonte: Mechi e Sanchez (2010); B) Desmonte hidráulico em Jacareí, às margens da Rodovia Dutra. Notar a barreira de eucaliptos plantada ao longo da rodovia para ocultar as cavas; C) Cava de extração de areia invadindo área de preservação e destruindo mata ciliar próximo ao rio Paraíba do Sul⁵.

⁵ Fonte das imagens B e C disponível em: <http://www.quimicosjc.org.br/pdfs/especiais/Cavas-de-areia-2012.pdf>

4.2 Variáveis da geodiversidade

O uso inadequado dos recursos naturais contribui para a diminuição da diversidade geológica, impactando negativamente os ecossistemas e os seres vivos que usufruem de seus benefícios. Por isso é fundamental considerar os elementos da geodiversidade no planejamento socioambiental, contribuindo com a sustentabilidade dos recursos.

Nesse sentido, Schrodtt *et al.* (2019) propuseram uma lista de variáveis para descrever os recursos e processos que ocorrem na superfície da Terra, denominadas *Essential Geodiversity Variables (EGVs)*. Classificadas em geologia, geomorfologia, solos e hidrologia, essas categorias podem embasar propostas de políticas públicas de geoconservação, equilibrando os aspectos econômicos, sociais e ambientais na promoção do desenvolvimento sustentável.

Com o intuito de demonstrar a importância dos recursos abióticos no desenvolvimento socioambiental local, justificando sua importância no âmbito da conservação da natureza, foram definidas seis variáveis da geodiversidade para a Bacia de Taubaté: i) rochas e estruturas; ii) recursos minerais; iii) fósseis; iv) formas de relevo; v) recursos hídricos; e vi) solos. Essas variáveis, além de importantes na oferta dos serviços ecossistêmicos da bacia, encontram-se sob-risco de degradação, especialmente decorrente da vulnerabilidade frente às ações antrópicas.

4.2.1 Rochas e estruturas

A região apresenta grande diversidade litológica variando desde rochas graníticas e gnáissicas do embasamento, de idades pré-cambrianas, a rochas sedimentares que apresentam variações dentro do seu contexto de preenchimento deposicional, correspondendo às Formações Resende, Tremembé, Pindamonhangaba e São Paulo, além de sedimentos quaternários (Riccomini, 1989). Essas rochas, além de evidenciarem parte da geodiversidade local, cujos registros podem ser observados nos geossítios inventariados que constituem o patrimônio geológico local (Garcia *et al.*, 2018; Reverte *et al.*, 2019), são também responsáveis por grande parte dos serviços ecossistêmicos identificados na região (Reverte *et al.*, submetido).

Com relação às estruturas, eventos tectônicos associados à instalação do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) resultaram em ocorrências geológicas

evidenciadas em falhas e estruturas observadas na região, que registram diferentes estágios dentro do contexto de evolução tectônica da Bacia de Taubaté.

4.2.2 Recursos minerais

Os recursos minerais do estado de São Paulo são agrupados em cinco grandes classes: minerais industriais, metálicos, gemas, recursos energéticos e água subterrânea. Dentre essas classes, na Bacia de Taubaté há predominantemente a ocorrência de minerais industriais — representados pelas areias e argilominerais —, água-subterrânea e minerais energéticos, embora outras ocorrências tenham sido descritas, tais como os depósitos quartzíticos e rochas graníticas, lavrados como brita, cantaria, revestimento ou ornamentação (Cabral Junior *et al.*, 2001).

As extrações de areia e argila correspondem aos principais potenciais minerais da bacia. De acordo com o cadastro mineiro do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2016), 60% do total de concessões de lavra de toda a região correspondem às extrações de areia, principalmente nos municípios de Jacareí, Tremembé e Taubaté, cuja maior parte da produção é voltada para o mercado da construção civil.

Os depósitos de argilas estão associados aos folhelhos da Formação Tremembé, constituídos por argilominerais que ao serem tratados com ativos químicos são comercializadas com a denominação de “bentonita”. Dentre as aplicações da bentonita, destacam-se o seu uso para: refino de óleos lubrificantes minerais, impermeabilização de solos, aglomeração de areias de fundição, processamento de óleos na produção de biodiesel, em fertilizantes e defensivos agrícolas dentre outras aplicações industriais conhecidas, corroborando sua importância econômica.

Embora as argilas e areias correspondam aos principais bens minerais da região, outros materiais também são extraídos para fins econômicos (Tabela 12). Ressalta-se ainda o aproveitamento das turfas ao longo das várzeas do rio Paraíba do Sul, utilizados como fertilizante ou em indústrias para fins energéticos (Garcia, 1994).

Tabela 12: Principais bens minerais presentes na Bacia de Taubaté por município. (Fonte: Saad, 1990; Campanha, 1994; DNPM, 2016).

BEM MINERAL	OCORRÊNCIA	USO
Areia	Caçapava, Guararema, Lorena, Jacareí e Tremembé	Agregado em construção civil
Argilas comuns	São José dos Campos, Jacareí, Taubaté, Pindamonhangaba e Tremembé	Agricultura, indústria de papel e celulose
Argilas plásticas e refratárias	Pindamonhangaba, Caçapava, Taubaté e Jacareí	Indústria química, fundição, cerâmica vermelha
Calcário e dolomito	Taubaté	Produção de cimento, construção civil
Folhelhos oleígenos	Tremembé	indústrias diversas e fins energéticos
Granitos, gnaisses e afins	São José dos Campos	Revestimento, ornamentação, cascalho
Linhito	Caçapava	indústrias diversas e fins energéticos
Turfa	São José dos Campos, Caçapava e Jacareí	Fertilizante agrícola e fins energéticos

4.2.3 Fósseis

A Bacia de Taubaté apresenta um rico conteúdo fossilífero depositado entre o Eoceno e o Oligoceno, representando a mais importante ocorrência fossilífera brasileira em virtude da diversidade, quantidade e qualidade da preservação dos fósseis (Bernardes-de-Oliveira *et al.*, 2002).

Ao longo dos anos foram descritos fósseis de restos de folhas e troncos de angiospermas, espículas de esponjas, crustáceos, tubos de vermes, gastrópodes, peixes, aves, répteis e mamíferos (Mezzalira, 1989; Garcia e Saad, 1996), encontrados em folhelhos da Formação Tremembé.

Nesse contexto, cabe destacar a presença do Museu de História Natural de Taubaté (MHNT), um importante centro de difusão das geociências, que além de possuir um extenso acervo de rochas, minerais e fauna local empalhada, abriga uma vasta coleção de fósseis e réplicas de animais que habitaram a região, incluindo o fóssil da *Paraphysornis brasiliensis*, uma ave carnívora que atingia 2,40 metros de altura e que habitou o Vale do Paraíba há 23 Ma. Seu esqueleto quase completo foi localizado na cidade de Tremembé na década de 1970 e hoje compõe a exposição permanente do MHNT (Fig. 13).

Figura 13: Exemplos de fósseis do Oligoceno encontrados na Bacia de Taubaté: A e B) Reconstituição e réplica da *Paraphysornis Brasiliensis*; C) Borboleta fóssil; D) Folha fóssil; E) *Taubatherium*, com arcada dentária no detalhe. Espécie encontrada apenas na região da bacia.

4.2.4 Formas de relevo

Inserida ao Planalto Atlântico Paulista (Almeida, 1967), entre as serras do Mar e da Mantiqueira, cujo sistema de montanhas constitui a feição orogênica mais destacada da borda atlântica do continente Sul-Americano (Almeida e Carneiro, 1998), a Bacia de Taubaté apresenta forma alongada com aproximadamente 170 km de comprimento, 25 km de largura em seu trecho mais largo e profundidade máxima de 850 metros (Vidal *et al.*, 2004).

A área norte da bacia é dominada por um relevo mais acidentado que constitui a escarpa da Serra da Mantiqueira, restringindo a ocupação humana. Na região de altitude mais elevada a vegetação ainda é natural e a urbanização se deu em planaltos restritos, como nos municípios de Santo Antônio do Pinhal e Campos do Jordão, importantes polos turísticos do estado de São Paulo. Ab'Saber (2003) afirma que a região pertence ao domínio dos mares de morros do Brasil Tropical Atlântico, esculpindo um cenário de rochas cristalinas e formas convexas. Nesse contexto, na Bacia de Taubaté ocorrem, predominantemente, colinas de topos convexos com altitudes de 600 a 700 metros que constitui a planície fluvial do rio Paraíba do Sul, cuja faixa de meandros e terraços fluviais se eleva entre três e oito metros acima do nível de inundação (Fig. 14).

A Serra do Mar, segundo Almeida e Carneiro (1998), corresponde a um conjunto de escarpas com aproximadamente 1000 km de extensão coberta por vegetação densa da Mata Atlântica, entre a costa dos estados do Rio de Janeiro e Santa Catarina, e altitudes que variam de 800 a 2300 metros. Sua gênese, posterior ao processo de separação do Supercontinente Gondwana, é atribuída a eventos

tectônicos ocorridos no Cenozoico, com movimentações verticais responsáveis pela formação de blocos falhados e desnivelados (Asmus e Ferrari, 1978), onde os processos erosivos passaram a atuar de forma intensa a partir do Cretáceo Inferior.

Figura 14: Perfil esquemático de direção NNO – SSE da Bacia de Taubaté. Fonte IPT (1981).

4.2.5 Recursos hídricos

A Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul representa uma das mais importantes do país, visto que abrange uma das regiões brasileiras de maior desenvolvimento e com alta densidade demográfica. Ocupa uma área de aproximadamente 55 mil km², estendendo-se pelos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Vale destacar que a bacia se encontra totalmente inserida no bioma da Mata Atlântica, um dos mais ameaçados do mundo e importante berço de fauna e flora brasileiro.

A região é cortada por uma série de rios que provém das serras do Mar e Mantiqueira, desaguando no rio Paraíba do Sul. Este, por sua vez, tem sua nascente a 1.800 metros de altitude na Serra da Bocaina, em São Paulo, e sua foz no município de São João da Barra, no Rio de Janeiro, percorrendo pouco mais de 1.300 km (Coltrinari, 2003).

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA, 2001), o rio Paraíba do Sul possui uma bacia alongada, com comprimento cerca de três vezes sua largura máxima. Sua planície de inundação, em seu trecho médio superior, é a mais larga e

extensa das planícies aluviais de compartimento de planalto existentes no interior das terras altas do Brasil sudeste, possuindo de 2,5 a 4,0 km de largura e extensão tão grande quanto à própria Bacia de Taubaté. Seu curso pode ser dividido em porções por meio da análise física da drenagem, considerando, principalmente, a declividade média. A área estudada pertencente ao Curso Médio Superior, que começa em Guararema e segue até Cachoeira Paulista (SP), onde a altitude é de 515 metros. Nesse trecho, o rio é bastante sinuoso e meandrado, percorrendo terrenos sedimentares de grandes várzeas.

Em relação à hidrogeologia, a região possui dois sistemas de aquíferos: o Sistema Aquífero Cristalino e o Sistema Aquífero Taubaté (ANA, 2001). De forma geral, os aquíferos apresentam propriedades que variam com a unidade geológica em que se encontram, refletindo no potencial hídrico (Iritani e Ezaki, 2009). Nesse contexto, Vidal e Chang (2002) corroboram que toda a região da bacia possui elevado potencial de exploração, com 338 poços subterrâneos em atividade (CPRM, 2019), sobretudo nas áreas que abrangem o Sistema de Aquífero Taubaté. Este aquífero é formado por rochas sedimentares do Grupo Taubaté as quais, por serem mais porosas, favorecem o armazenamento de água pluvial.

4.2.6 Solos

Segundo Oliveira *et al.* (1999), os solos da região estão enquadrados em quatro grandes categorias: Argissolos, Cambissolos, Gleissolos e Latossolos.

Com base na classificação da EMBRAPA (2013), na região são descritos:

- Argissolos: são os solos mais profundos da bacia, de textura argilosa e com baixos teores de matéria orgânica;
- Cambissolos: constituídos por material mineral, com horizonte B, são encontrados na região das bordas da bacia e em relevos montanhosos escarpados, com vegetação de floresta ombrófila;
- Gleissolos: são os solos minerais formados em condições de saturação com água, presentes principalmente em planícies ou várzeas inundáveis. Na região, estão relacionados às várzeas do rio Paraíba do Sul;

- Latossolos: apresentam intemperização intensa, baixa fertilidade e alta permeabilidade, visto que são bem estruturados e muito porosos. Ocorrem na área associados a relevos suavemente ondulados e planos (Rampanelli *et al.*, 2011).

Os solos sempre desempenharam papéis fundamentais no progresso econômico da região da Bacia de Taubaté, servindo há séculos como suporte para desenvolvimento de inúmeras atividades agrícolas voltadas ao mercado consumidor. No início do século XIX, por exemplo, foi nessa localidade que o café se tornou o principal produto de exportação brasileira, atingindo seu apogeu em 1850, quando 80% de todo o café e 37% da produção agropecuária do estado de São Paulo eram oriundos do Vale do Paraíba (Devide, 2015). A região do Vale era considerada muito apropriada para a cafeicultura por possuir clima favorável ao cultivo e solos muito férteis. Inicialmente produzido por mão de obra escrava, o café proporcionou grande prosperidade econômica para a região e influência política aos cafeicultores locais (Sobrinho, 1978).

Atualmente, os solos continuam a promover a agricultura local, com destaque para a produção de arroz, cultivado ao longo das várzeas do rio Paraíba do Sul, principalmente nos municípios de Tremembé e Taubaté.

5. INVENTÁRIO DE GEOSSÍTIOS COMO INSTRUMENTO DE GESTÃO E PRESERVAÇÃO DA MEMÓRIA GEOLÓGICA: EXEMPLO DE GEOSSÍTIOS VULNERÁVEIS DA BACIA DE TAUBATÉ (SÃO PAULO, BRASIL)

Artigo publicado no periódico “Pesquisas em Geociências”.

doi:<https://doi.org/10.22456/1807-9806.93252>

Resumo: Localizada no segmento central do Rifte Continental do Sudeste do Brasil, na porção leste do Estado de São Paulo, a Bacia de Taubaté ocupa uma área de aproximadamente 2400 km². A região representa um local-chave no entendimento da história geológica associada ao pós-Gondwana, apresentando elevada geodiversidade que tem sido afetada tanto por atividades antrópicas quanto pela ação de processos naturais. Por este motivo, como forma de promover a geoconservação de afloramentos representativos no contexto de evolução do rifte, foi realizado o inventário do patrimônio geológico na região. Para abranger todo este contexto geológico, três categorias foram definidas: (i) abertura da bacia; (ii) deformação e deposição neógena; e (iii) deformação quaternária e evolução do relevo. Inicialmente 38 potenciais geossítios foram identificados por meio de levantamento bibliográfico, consulta a pesquisadores e trabalhos de campo. Após a etapa de campo, verificou-se que muitos dos pontos descritos na literatura foram destruídos ou encontram-se extremamente alterados, de modo que apenas 18 geossítios compõem o inventário final. A avaliação qualitativa do inventário revela que as ações antrópicas, tais como obras de infraestrutura e atividades de mineração, correspondem ao principal fator de perda da geodiversidade local. Por isso, os resultados deste inventário devem ser considerados nas políticas públicas de gestão territorial, possibilitando o prosseguimento de estudos futuros nestes locais, de forma a conservar a memória geocientífica deste importante segmento do sudeste do Brasil.

Palavras-chave: Bacia de Taubaté, patrimônio geológico, categorias geológicas, vulnerabilidade.

O inventário de geossítios como instrumento de gestão e preservação da memória geológica: exemplo de geossítios vulneráveis da Bacia de Taubaté (São Paulo, Brasil)

The inventory of geosites as an instrument for the management and preservation of the geological memory: example of vulnerable geosites of the Taubaté Basin (São Paulo State, Brazil)

Fernanda Coyado REVERTE^{1,2}, Maria da Glória Motta GARCIA¹, José BRILHA² & Thaís Trevisani MOURA³

- (1) Núcleo de Apoio à Pesquisa em Patrimônio Geológico e Geoturismo (GeoHereditas), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Rua do Lago, 562, Térreo, Bloco D, Sala 11, CEP 05508-080, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: fernanda.reverte@usp.br; mgmgarcia@usp.br.
- (2) Instituto de Ciências da Terra, polo da Universidade do Minho. Campus de Gualtar, CEP 4710-057, Braga, Portugal. E-mail: jbrilha@ict.uminho.pt.
- (3) Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo Rua do Lago, 562, CEP 05508-080, São Paulo, SP, Brasil. E mail: thaistrevisani@usp.br.

Abstract. The Taubaté Basin occupies an area of approximately 2400 km² in the eastern portion of the state of São Paulo, in the central part of the so-called "Continental Rift of Southeastern Brazil". The region represents a key location in the understanding of the geological history related to post-Gondwana and has high geodiversity that has been affected both by anthropic activities and the result of natural processes. For this reason, as a way to promote the geoconservation of the outcrops that are representative of the rift evolution, an inventory of the region's geological heritage was carried out. Three geological frameworks were defined to encompass the context of rift evolution: (i) basin opening; (ii) Neogenic deposition and deformation; and (iii) Quaternary deformation and landform evolution. The 38 potential geosites were initially selected through bibliographical survey, consultation with researchers and fieldwork. Subsequent field work revealed that many of the points described in the literature had either been destroyed or were extremely degraded. This way, the final list of the inventory was reduced to as few as 18 geosites. The qualitative evaluation of the inventory shows that anthropic actions, such as infrastructure work and mining activities, are the main cause of loss of local geodiversity. For this reason, the results of this inventory should be considered in public policies of territorial management, so as to allow the continuation of future studies in these places, in order to preserve the geoscientific memory of this important segment of southeastern Brazil.

Keywords. Taubaté Basin, geoheritage, geological frameworks, vulnerability.

1 Introdução

Desde os primórdios das civilizações o conhecimento acerca do território é um fator fundamental à sobrevivência dos seres humanos, condicionando a escolha dos melhores locais para a sua instalação e desenvolvimento, ou seja, aqueles favorecidos pela geodiversidade em virtude da demanda de recursos por ela disponibilizados. A geodiversidade resulta do conjunto de fenômenos e processos intrínsecos à dinâmica da Terra originando os mais variados elementos, tais como minerais, rochas, fósseis, solos e formas de relevo, que servem como suporte ao desenvolvimento de todas as espécies (Stanley, 2000; Brilha, 2005). As ocorrências que apresentam relevância do ponto de vista científico são definidas por Brilha (2016) como geossítios; para aquelas sem valor científico, mas ainda assim com interesses estético, educativo e/ou turístico, o autor sugere o uso do termo sítio de geodiversidade.

Os geossítios correspondem a uma pequena parcela da geodiversidade e são representativos por conterem registros importantes da evolução da Terra, o que nos permite, por exemplo, compreender eventos ocorridos no passado e antecipar possíveis acontecimentos futuros. No entanto, a falta de conhecimento quanto às limitações de uso dos geossítios, bem como ao risco de degradação a que estão submetidos, afetados tanto pela ação de processos naturais quanto por atividades antrópicas, contribuem para uma utilização inadequada destas áreas e, eventualmente, com a sua destruição.

Neste contexto, o aumento da exploração de recursos naturais e a ocupação desordenada do território vêm afetando cada vez mais a geodiversidade do planeta, colocando em risco recursos que não são renováveis em nossa escala de tempo. Assim, tendo em vista a necessidade de promover o uso sustentável dos elementos da geodiversidade, surge um novo ramo das Ciências da Terra, denominado Geoconservação, que tem por objetivos promover a gestão de geossítios, valorizando e conservando parte da geodiversidade (Henriques et al., 2011).

Para atingir os objetivos propostos pela geoconservação, diversos métodos foram desenvolvidos ao longo dos últimos quinze anos (Bruschi & Cendrero, 2005; Pereira, 2006; Zouros, 2007; García-Cortéz & Carcavilla Urquí, 2009, por exemplo). O método proposto por Brilha (2005, revisado em 2016) se constitui em uma metodologia “clássica” e foi muito utilizado para a quantificação de geossítios em

diversos países. No Brasil, esta nova proposta sugerida pelo autor em 2016 e que quantifica de maneira distinta geossítios e sítios de geodiversidade, foi adotada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) para o desenvolvimento de uma plataforma online, denominada GEOSSIT, concebida como forma de promover o cadastro e avaliação de sítios geológicos inventariados em todo território nacional.

Além de Brilha (2016), a referida plataforma também adaptou o método proposto por García-Cortéz & Carcavilla Urquí (2009), por apresentar quesitos relativos aos interesses científico, educativo e turístico, bem como parâmetros adotados ao cálculo da vulnerabilidade inerente aos locais inventariados. Este último permite hierarquizar a necessidade de proteção destes locais, de modo que sejam adotadas medidas de geoconservação, quando cabíveis, sejam eles geossítios ou sítios de geodiversidade.

Ainda neste contexto, alguns autores têm enfatizado a importância da geoconservação por meio da sistematização de categorias que buscam valorar o patrimônio geológico (Gray, 2004, 2005; Brilha 2005, 2016; Pereira, 2010; Mochiutti et al., 2011; Gray et al., 2013).

Gray (2013), por exemplo, definiu um novo sistema de valoração que inclui parâmetros voltados à geodiversidade, nomeado pelo autor como “Serviços Geossistêmicos” (Geosystem Services). Tais parâmetros incluem, além do valor intrínseco, quesitos que quantificam e qualificam os recursos oriundos da natureza, variando desde os processos e produtos, como ciclo hidrológico e os recursos naturais disponibilizados pelo planeta, até suporte e cultura, através do uso dos elementos da geodiversidade enquanto substrato e disseminação do conhecimento geocientífico.

Seguindo neste escopo, uma forma de contribuir com a geoconservação de uma determinada área é por meio da realização de um inventário sistemático. As informações obtidas através da identificação e descrição dos geossítios inventariados podem servir como base para a avaliação quantitativa e qualitativa destes locais no âmbito da relevância, uso sustentável dos seus recursos e risco de degradação, de modo a reconhecer as principais ameaças e estabelecer critérios de prioridade para a conservação.

O inventário, neste contexto, segundo Reynard & Brilha (2018), possibilita avaliar as necessidades para a conservação dos geossítios ao considerar: (i) análise do uso potencial; (ii) características físicas do local; e (iii) potenciais ameaças, tanto

naturais quanto antrópicas. A partir desta avaliação, os autores afirmam que é possível desenvolver um plano de gerenciamento de modo a minimizar possíveis danos.

Desta forma, muitos autores têm proposto métodos voltados à gestão e geoconservação de áreas consideradas relevantes a partir de inventários sistemáticos do patrimônio geológico (Fuentes-Gutiérrez & Fernández-Martínez, 2010; Fuentes-Gutiérrez *et al.*, 2016; Moura *et al.*, 2017). Poiraud *et al.* (2016), por exemplo, com base em experiência obtida no *Vercors Regional Natural Park*, na França, afirmam que o inventário representa uma importante ferramenta ao planejamento territorial, incidindo em intervenções voltadas à pesquisa científica, disseminação do conhecimento geocientífico e no geoturismo. Estas ações, por sua vez, podem refletir no contexto sociocultural e nos interesses econômicos do local.

Diante do exposto, como forma de criar as bases para priorizar medidas de conservação do patrimônio geológico da Bacia de Taubaté, foco deste trabalho, foi realizado o inventário da região. Dois motivos principais condicionaram a escolha da área para a realização do inventário de geossítios. Primeiro, porque a geodiversidade desta região representa parte importante na história geológica do sudeste brasileiro, apresentando diversos afloramentos didáticos utilizados em atividades de campo nos cursos de Geociências. O segundo decorre do risco de degradação dos afloramentos, resultante tanto da ação de intemperismo severo, característico de regiões tropicais, quanto de intensas atividades antrópicas, o que constitui um excelente laboratório para aplicar ferramentas específicas de avaliação e gestão do patrimônio geológico. Alguns afloramentos, que apresentam litotipos, estruturas e/ou fósseis de inestimável valor científico, estão vulneráveis à degradação e destruição, tornando-se imprescindível tentar preservá-los de modo que a memória geológica seja mantida para estudantes e pesquisadores.

O inventário aqui apresentado corresponde a uma das etapas da pesquisa de doutorado da primeira autora e servirá como subsídio para avaliar o decréscimo da geodiversidade local e quanto isso pode comprometer a disponibilização dos serviços geossistêmicos na região.

2 Área, materiais e métodos

2.1 Área de estudo

Localizada entre as Serras do Mar e da Mantiqueira, a Bacia de Taubaté apresenta forma alongada com aproximadamente 170 km de comprimento, 25 km de largura e uma profundidade sedimentar com espessura máxima de 850 m (Vidal *et al.*, 2004). Trata-se de uma bacia sedimentar de idade cenozoica, cuja formação está associada à abertura do Oceano Atlântico. Situada na porção leste do Estado de São Paulo, abrange onze municípios: Jacareí, São José dos Campos, Caçapava, Taubaté, Tremembé, Pindamonhangaba, Roseira, Aparecida, Guaratinguetá, Lorena e Cruzeiro (Fig. 1).

Figura 1. Mapa de localização da Bacia de Taubaté. A) Localização no Brasil; B) Localização no Estado de São Paulo; C) Delimitação da Bacia de Taubaté (em vermelho) com indicação do rio Paraíba do Sul.

Figure 1. Location map of the Taubaté Basin. A) Location in Brazil; B) Location in São Paulo State; C) Delimitation of Taubaté Basin (in red) indicating of the Paraíba do Sul River.

A região é atravessada por importantes rodovias que se encontram em

frequente mudança em virtude da alta concentração populacional. As principais vias de acesso são as rodovias Ayrton Senna, Governador Carvalho Pinto (SP-70) e a Presidente Dutra (BR-116). A área do município de Taubaté é servida ainda pela antiga Estrada de Ferro Central do Brasil (EFCB), a qual, juntamente com a rodovia Presidente Dutra, liga os estados do Rio de Janeiro e São Paulo, importantes polos comerciais e industriais do país.

2.1.1 Aspectos geomorfológicos e o rio Paraíba do Sul

Integrada no Planalto Atlântico Paulista (Almeida, 1964), no denominado Vale do Paraíba, a Bacia de Taubaté está inserida entre as Serras do Mar e da Mantiqueira, abrangendo compartimentos geomorfológicos classificados por Florenzano & Csordas (1993) como colinas pequenas e tabuliformes, escarpas em anfiteatros, morros alongados paralelos e com espigões, morros arredondados, planícies aluviais, serras e terraços baixos.

Neste escopo, as Serras do Mar e da Mantiqueira apresentam relevo escarpado com elevações de pequeno porte que variam entre 600 e 750 m na região, além de serras alongadas na direção NE, com declives acentuados e altitudes variando entre 50 e 150 m. Caracterizam-se ainda pela presença de densa floresta que recobre os morros costeiros e que está submetida a forte influência de processos erosivos, os quais também atuam de forma incisiva na região da referida bacia.

Segundo Ab'Saber (2003), a região pertence ao domínio dos Mares de Morros do Brasil Tropical Atlântico, esculpindo um cenário de rochas cristalinas e formas convexas. Neste contexto, na Bacia de Taubaté ocorrem, predominantemente, colinas de topos convexas com altitudes que variam de 600 a 700 m e constitui a planície fluvial do rio Paraíba do Sul, cuja faixa de meandros e terraços fluviais se eleva entre 3 a 8 m acima do nível de inundação. O rio Paraíba do Sul tem sua nascente na Serra da Bocaina, em São Paulo, e sua foz no município de São João da Barra, no Rio de Janeiro, percorrendo cerca de 1.150 km. É o principal corpo d'água da região do Vale do Paraíba e drena uma área de 55 mil km², distribuída pelos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro.

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA, 2001), o rio Paraíba do

Sul possui uma bacia alongada, com comprimento cerca de três vezes a sua largura máxima. A planície de inundação é a mais larga e extensa das planícies aluviais de compartimento de planalto existentes no interior das terras altas do sudeste do Brasil, possuindo até 4 km de largura e extensão tão grande quanto à própria Bacia de Taubaté. Na região de Guararema, o rio se apresenta bastante sinuoso, percorrendo terrenos sedimentares de grandes várzeas.

Alguns autores (Almeida, 1964, 1976; Riccomini *et al.*, 1987; Riccomini, 1989) afirmam que o traçado do rio resulta da atuação de forças tectônicas que formaram o Gráben do Paraíba através do abatimento de blocos continentais entre dois altos topográficos, estabelecido no sistema de bacias tafrogênicas continentais do sudeste do Brasil. Neste contexto, o aprofundamento do rio alterou bruscamente sua morfologia e seu percurso por meio de uma captura fluvial, conhecida como Cotovelo de Guararema.

2.1.2 Contexto Geológico

A Bacia de Taubaté faz parte de um conjunto de bacias pertencentes ao Rifte Continental do Sudeste do Brasil – RCSB – (Riccomini, 1989), tendo sido relacionada à fase tardia do evento de ativação tectônica da Plataforma Sul Americana, associada com a fragmentação do supercontinente Gondwana e a abertura do Atlântico Sul. O RCSB corresponde a uma feição tectônica de idade cenozoica que ocorre entre as cidades de Curitiba, no Paraná, e Barra de São João, no Rio de Janeiro. Apresenta-se como uma faixa estreita e deprimida, alongada na direção NE, possuindo extensão de pouco mais de 900 km. O rifte pode ser dividido em três segmentos: ocidental, central e oriental (Riccomini *et al.*, 1987, 2004; Riccomini, 1989). As rochas de seu substrato indicam a atuação de um regime transcorrente sinistral, com compressão de direção NE-SW e distensão NW-SE. Este evento, ocorrido entre o Neocretáceo e o Paleoceno, foi reconhecido em corpos alcalinos de idade neocretáceas, no sul do Estado de São Paulo (Riccomini, 1993) e na região do Gráben da Guanabara (Ferrari, 2001). Dessa forma, o regime transcorrente sinistral precederia o distensivo de direção NNW-SSE, este responsável pela instalação das bacias (Riccomini *et al.*, 2004).

Posicionada no segmento central do RCSB, a Bacia de Taubaté corresponde

a uma bacia assimétrica, formada internamente por regiões deprimidas e elevadas. Consiste na maior depressão tectônica do referido rifte, apresentando seção sedimentar mais espessa, com cerca de 800 m de espessura (Fernandes & Chang, 2003). Sua forma alongada é condicionada por descontinuidades antigas de direção principal ENE do embasamento, que favoreceram uma tectônica ressurgente (Fernandes, 1993; Fernandes & Chang, 2001).

A bacia encontra-se bordejada pelas Serras da Mantiqueira e do Mar, a norte e a sul, respectivamente, sendo limitada pelas falhas do Alto da Fartura e Buquira. Tem seu arcabouço formado por hemi-grábens separados por zonas de transferências com depocentros invertidos, em típica geometria de bacia do tipo rifte, com assimetria na direção longitudinal (Vidal *et al.*, 2004) e apresenta segmentação regida pelas referidas zonas de transferência, representadas pelos altos estruturais de Caçapava, de direção NNE-SSW, e de Pindamonhangaba, de direção NW-SE.

Fernandes & Chang (2001) definiram três compartimentos alongados na Bacia de Taubaté, nomeados de SW para NE: São José dos Campos, correspondente à porção menos profunda da bacia; Taubaté, que chega a alcançar 600 m de espessura de sedimentos; e Aparecida, com as maiores espessuras sedimentares, atingindo cerca de 800 m.

O embasamento da Bacia de Taubaté compreende rochas metamórficas de baixo e médio grau, além de suítes granitoides intrusivas de idades pré-cambrianas do Cinturão Ribeira (Almeida, 1976), apresentando uma série de zonas de cisalhamento de direção E-W a ENE-WSW ativas até o fim do Ciclo Brasileiro.

Segundo o modelo tectono-sedimentar proposto por Riccomini (1989) (Fig. 2), entre o Eoceno e o Oligoceno a região entrou em processo tectônico distensivo, com sentido NNW-SSE, em função do basculamento termomecânico ocorrido na Bacia de Santos, desenvolvendo um grande gráben orientado na direção ENE-WSW e mergulho para NNW. Nessa fase, seus processos de sedimentação foram estabelecidos e divididos pelo autor em duas etapas: a primeira, *sin*-tectônica ao rifte, é representada pela deposição do Grupo Taubaté, um expressivo pacote tectono-sedimentar, de idade paleogênica, composto pelas Formações Resende, Tremembé e São Paulo; e outra diastrófica, preenchida pelos sedimentos recentes da Formação Pindamonhangaba.

Figura 2. Litoestratigrafia e evolução tectono-sedimentar do segmento central do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989).

Figure 2. Continental Rift of Southeastern Brazil: lithostratigraphy and tectono-sedimentary evolution of its central segment. (Riccomini, 1989).

Durante o Mioceno a bacia sofreu movimentação transcorrente sinistral no sentido E-W, com componente distensiva NW-SE e compressiva NE-SW, que conduziram à segmentação do gráben nas bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda, acarretando no desenvolvimento das soleiras de Arujá e Floriano. Após essa movimentação, houve a sedimentação em sistemas fluviais entrelaçados da Formação Itaquaquecetuba. No Pleistoceno houve uma inversão no sentido de movimentação do sistema de falhas transcorrentes, passando a ser dextral, invertendo também o sentido das zonas de compressão e distensão. Esta reativação conduziu ao desenvolvimento dos altos estruturais de Caçapava, Capela de Santa Luzia e Capela Nossa Senhora do Socorro, segmentando a Bacia de Taubaté. Neste período houve a deposição da Formação Pindamonhangaba, com características de um sistema fluvial meandrante.

Durante o Quaternário, a bacia entrou novamente em um processo tectônico distensivo com direção WNW-ESSE, acarretando na formação da sub-bacia de Bonfim e na deposição de sedimentos colúvio-aluviais do rio Paraíba do Sul. Atualmente, estudos mostram que a Bacia de Taubaté está sob um regime compressivo (Assumpção, 1998).

2.2 Métodos

2.2.1 Definição das categorias geológicas

As categorias temáticas geológicas, ou *geological frameworks*, emergem como um meio facilitador na elaboração de um inventário sistemático, pois permitem catalogar os locais de interesse geológico de uma região com base em conteúdos previamente definidos e não por áreas geográficas. Segundo Lima (2008), a definição destas categorias normalmente se baseia em divisões, que podem variar de acordo com o objetivo do inventário, tais como: áreas da geologia (paleontologia, estratigrafia, mineralogia, tectônica); tempo geológico (Arqueano, Proterozoico, Fanerozoico, Cenozoico); ou contexto geológico (Bacia de Taubaté, Ciclo Brasileiro, sistema orogênico da Mantiqueira, por exemplo).

O uso de categorias temáticas para a realização de inventários vem sendo adotado em diversos países europeus há décadas (Wimbledon, 1996; Gonggrijp, 2000). No Brasil, a primeira iniciativa de realização de um inventário do patrimônio geológico ocorreu com a instalação da Comissão Brasileira dos Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), em 1997, que definiu doze categorias, ou tipologias principais (Mansur *et al.*, 2013), para a descrição dos geossítios brasileiros: astroblema, estratigráfico, história da geologia (mineração, paleontologia), ambiente marinho, espeleológico e geomorfológico, são alguns exemplos.

Para o presente trabalho, o inventário realizado na região da Bacia de Taubaté levou em consideração, prioritariamente, o valor científico da área, representado em afloramentos considerados relevantes do ponto de vista geológico por conterem registros do contexto da instalação, evolução tectônica e sedimentar da referida bacia. Desse modo, com base em pesquisa bibliográfica sobre a área de estudo, foram definidas três categorias temáticas: (i) abertura da bacia; (ii) deformação e deposição neógena; e (iii) deformação quaternária e evolução do relevo.

2.2.2 Seleção de potenciais geossítios

Após a definição das categorias temáticas, iniciaram-se as pesquisas voltadas

à seleção de potenciais geossítios. Nesta etapa, buscou-se priorizar locais que já haviam sido descritos na literatura da área de estudo. Foram realizadas consultas tanto à bibliografia publicada sobre a área, incluindo pontos descritos no inventário do Estado de São Paulo (Garcia *et al.*, 2017), quanto a pesquisadores que trabalharam ou estudaram no local, visto que estes profissionais possuem referências que podem qualificar e justificar a delimitação de um geossítio. O principal objetivo desse inventário foi descrever locais geologicamente representativos, selecionados por se constituírem em locais-chave para a compreensão da história geológica da bacia.

2.2.3 Atividades de campo

A partir na listagem obtida na etapa anterior, procedeu-se à investigação dos potenciais geossítios através de trabalho de campo para averiguar as informações obtidas previamente na síntese bibliográfica, além de visitar novos sítios indicados por pesquisadores.

Todos os sítios foram fotografados, descritos e analisados no âmbito do valor científico, incluindo informações sobre a relevância e integridade, fundamentais à avaliação do geossítio. Além destes fatores, levou-se em consideração o estágio de fragilidade atual destas áreas, visto que os afloramentos da região se encontram submetidos a elevado grau de intemperismo. Ademais, toda a região do Vale do Paraíba está em crescente transformação, o que torna estes locais ainda mais vulneráveis em decorrência de atividades antrópicas.

2.2.4. Seleção final

Dos 38 potenciais geossítios analisados (Quadro 1), 47% estão incluídos no inventário final. Os 53% restantes foram desconsiderados devido às seguintes razões: (i) ocorrências descritas em trabalhos científicos que, ao serem georreferenciadas, se encontravam fora da área de estudo e, por isso, não foram visitadas (13%); (ii) sítios cujas feições geológicas não estavam mais visíveis por conta da atuação do intemperismo severo (8%); (iii) sítios que não eram os exemplos mais representativos da feição/estrutura desejada (5%); e (iv) locais que foram danificados, de forma irreversível, em decorrência de obras de infraestrutura no Vale do Paraíba, como duplicação de rodovias e construção de empreendimentos

imobiliários (27%). Estes percentuais indicam que atividades antrópicas correspondem às principais responsáveis pela perda do patrimônio geológico da área de estudo.

Quadro 1. Lista de potenciais geossítios, breve descrição da condição das feições/estruturas observadas em campo e inclusão do geossítio no inventário.

Chart 1. List of potential geosites, brief description of the condition of the site's features/structures seen in the field and inclusion of the geosite for the inventory.

Ponto	Condição de observação das feições/estruturas dos pontos visitados	Geossítio
BT 01	Excelente exposição, especialmente após período de mineração	Sim
BT 02	Exposto em rodovia com feições visíveis (submetido às intempéries naturais)	Sim
BT 03	Mirante – Excelente exposição	Sim
BT 04	Excelente exposição de feições/estruturas	Sim
BT 05	Intemperizado e algumas das feições descritas não são mais visíveis	Sim
BT 06	Feições não são mais visíveis (ponto muito intemperizado)	Não
BT 07	Muito intemperizado, mas feições ainda são visíveis	Sim
BT 08	Exposto em rodovia com feições visíveis (submetido às intempéries naturais)	Sim
BT 09	Exposto em obra do Aeroporto, com feições visíveis	Sim
BT 10	Exposto em obra do Aeroporto, com feições visíveis	Sim
BT 11	Exposto em estrada secundária, feições muito intemperizadas, mas visíveis	Sim
BT 12	Totalmente gramado em corte da rodovia	Sim
BT 13	Totalmente gramado em corte da rodovia	Sim
BT 14	Ponto não localizado, estrada pavimentada no local	Não
BT 15	Feições não são mais visíveis (ponto muito intemperizado)	Não
BT 16	Feições não são mais visíveis (ponto muito intemperizado)	Não
BT 17	Visível em um meandro do rio, sem feições representativas	Não
BT 18	Visível em um trecho do rio, sem feições representativas	Não
BT 19	Exposto em rodovia, feições pouco alteradas ao intemperismo natural	Sim
BT 20	Ponto não localizado, propriedade particular no local	Não
BT 21	Feições não são mais visíveis (ponto muito intemperizado)	Não
BT 22	Excelente exposição em pedreira de exploração (mas não é o mais representativo)	Não
BT 23	Excelente exposição de feições/estruturas (em rodovia)	Sim
BT 24	Ponto não localizado, propriedade particular no local	Não
BT 25	Excelente exposição de feições/estruturas	Sim
BT 26	Ponto em estrada secundária com boa exposição (feições pouco intemperizadas)	Sim
BT 27	Ponto não localizado, propriedade particular no local	Não
BT 28	Ponto em estrada secundária com boa exposição (feições pouco intemperizadas)	Sim
BT 29	Mirante – Excelente exposição (mas não é o mais representativo)	Não
BT 30	Ponto não localizado, propriedade particular no local	Não
BT 31	Totalmente gramado em corte da rodovia	Sim
BT 32	Feições não são mais visíveis (ponto muito intemperizado)	Não
BT 33	Ponto não localizado, propriedade particular no local	Não

A lista final resultou em 18 geossítios que se encontram distribuídos ao longo de toda região da bacia (Fig. 3). Estes locais foram quantificados, por meio do GEOSSIT, com o intuito de calcular o risco de degradação e o grau de vulnerabilidade inerente a cada um deles perante estas atividades potencialmente destruidoras.

Figura 3. Mapa com a localização dos geossítios (verde) e potenciais geossítios (vermelho) da Bacia de Taubaté. Importante ressaltar que alguns dos locais escolhidos encontram-se muito próximos de locais que foram eliminados na seleção final por não existirem mais, enfatizando a fragilidade destas áreas de importante interesse científico.

Figure 3. Map with the location of geosites (green) and potential geosites (red) of the Taubaté Basin. It is important to emphasize that some of the chosen sites are very close to places that were eliminated in the final selection because they no longer exist, highlighting the fragility of these areas of important scientific interest.

3 Resultados

O patrimônio geológico da Bacia de Taubaté foi enquadrado dentro de três categorias geológicas (Quadro 2): (i) abertura da bacia; (ii) deposição e deformação neógena; e (iii) deformação quaternária e evolução do relevo. Estas categorias estão relacionadas com a história geológica evolutiva da bacia e têm como base o quadro tectônico e litoestratigráfico da região, descrito anteriormente no contexto geológico (Fig. 2). Na primeira categoria, em virtude da deposição do Grupo Taubaté, foram enquadrados também geossítios com interesse paleontológico. Na última categoria acrescentou-se o conteúdo geomorfológico atual o qual, além de registrar eventos associados à fase final no contexto de evolução da bacia, reflete a evolução mais recente do relevo.

Quadro 2. Categorias geológicas da Bacia de Taubaté.
 Chart 2. Geological Frameworks of the Taubaté Basin.

Categorias	Breve descrição	Geossítios
Abertura da bacia	Embasamento pré-cambriano; Formação da depressão (<i>gráben</i>); Deposição do Grupo Taubaté; Ocorrências fossilíferas.	08
Deposição e deformação neogena	Compressão de direção NW-SE e Compressão para NE-SE; Deposição da Formação Pindamonhangaba.	05
Deformação quaternária e evolução do relevo	Nova extensão para NW-SE; Deposição dos colúvios; Atual compressão E-W; Elementos geomorfológicos.	05

Para esta categoria temática considerou-se o arcabouço da Bacia de Taubaté e os eventos relacionados à sua formação. Como arcabouço, foram selecionados os afloramentos do embasamento pré-cambriano, que compreendem os gnaisses e granitoides do Cinturão Ribeira, e as rochas alcalinas que precedem a instalação da bacia, do Neocretáceo.

Quanto à formação da bacia, foram selecionados afloramentos do próprio preenchimento sedimentar concomitante à fase de abertura, representados pelo Grupo Taubaté, que por sua vez compreende as Formações Resende, Tremembé e São Paulo, respectivamente, assim como estruturas *sin*-deposicionais, tais como diques clásticos e falhas, que permitem explicar sobre os esforços geradores da bacia.

Dentre os sítios paleontológicos destaca-se o conteúdo fossilífero da Formação Tremembé, que representa o intervalo de tempo entre o Eoceno e o Oligoceno. Ocorrem fósseis e icnofósseis de folhas e troncos de angiospermas, espículas de esponjas, tubos de vermes, gastrópodes, peixes, aves, répteis e mamíferos (Mezzalira, 1989). Estes dois geossítios, catalogados pelo SIGEP em 2002 e que também compõem o inventário do Estado de São Paulo (Garcia *et al.*, 2017), se configuram num patrimônio natural de uma riqueza singular e vem atraindo a atenção não só de pesquisadores, mas do público em geral, que busca conhecer e compreender mais a respeito da história da vida passada do planeta.

No geral, a categoria em questão possui um total de oito geossítios (Quadro 3). Apresenta características e feições distintas entre si, que contam a história inicial da bacia (Fig. 4A a G), incluindo o registro de atividade biológica (Fig. 5A a E):

Quadro 3. Geossítios da categoria geológica “Abertura da bacia”.
 Chart 3. Geosites of the “Basin opening” geological framework.

Nome	Coordenadas (UTM)	Características principais	Unidade litoestratigráfica (Perrotta <i>et al.</i> 2005)
Injectitos da Formação Resende (Fig. 4A)	397522 / 7431521	Injeções de diques clásticos de direção NE em argilito da Formação Resende	Formação Resende
Falhas <i>sin</i>-sedimentares da Formação Resende (Fig. 4B)	502991 / 7500581	Falhas relacionadas à instalação da bacia, contemporâneas à deposição da Formação Resende	Complexo Embu – Unidade Paragnáissica
Falhas da Formação São Paulo (Fig. 4C)	380863 / 7432457	Falha listrica deformando as rochas da Formação São Paulo	Granito Morro Azul
Exposição sedimentar da Formação Resende (Fig. 4D)	393263 / 7422119	Arenitos e conglomerados mal selecionados da Formação Resende	Formação Resende
Leques proximais da Formação Resende (Fig. 4E)	425216 / 7432551	Zona de contato entre as rochas do embasamento e da Formação Resende	Granito Serra do Jambeiro
Rochas graníticas do embasamento da bacia (Fig. 4F e G)	427296 / 7447530	Granitos do embasamento	Depósitos aluvionares
Fazenda Santa Fé (Fig. 5A, B e C)	444956 / 7462210	Ocorrência mais significativa de fósseis do sudeste do Brasil: microfósseis, icnofósseis, moluscos, artrópodes, peixes, anfíbios, répteis, aves e mamíferos	Formação Tremembé
Jazigo Quiririm (Fig. 5D e E)	434280 / 7459956	Mais importante ocorrência de macrofitofósseis (diversidade taxonômicas de angiospermas dicotiledôneas)	Formação Tremembé

Figura 4. Geossítios da categoria geológica “Abertura da bacia”. A) Dique de material arenoso cortando argilitos da Formação Resende; B) Falhas *sin*-sedimentares que afetam os argilitos da Formação Resende. Observar, no lado direito da fotografia, a falha principal de direção NE-SW, que marca o contato entre embasamento pré-cambriano e a Formação Resende; C) Falha normal de

direção NE-SW que deforma as rochas da Formação São Paulo e falhas inversas no lado direito da imagem; D) Lentes com conglomerado clasto suportado na base em contato com arenito mais fino na base, ilustrando a deposição intercalada de grãos mais grossos e finos; E) Depósito de leque aluvial com a presença de blocos decimétricos do embasamento; F) Embasamento granítico pré-cambriano, muito alterado, que aflora no leito do rio Paraíba do Sul; G) Sedimentos quaternários depositados na borda do rio.

Figure 4. Geosites of the “Basin opening” geological framework. A) Dike of sandy material cutting across mudstones of the Resende Formation; B) Sin-sedimentary faults affecting the mudstones of the Resende Formation. Note, on the right side of the photograph, the main NE-SW fault, which marks the contact between the pre-Cambrian basement and the Resende Formation; C) Normal NE-SW fault that deforms the São Paulo Formation rocks, and inverse faults on the right side of the image; D) Clast-supported conglomerate lenses in contact with thinner sandstone in the base, showing alternating deposition of coarser and finer grains; E) Alluvial fan deposit with decimetric clasts from the crystalline basement; F) Very-altered Pre-Cambrian granitic basement, can be seen on the Paraíba do Sul River bed; G) Quaternary sediments deposited along the river margin.

Figura 5. Geossítios paleontológicos da categoria geológica “Abertura da bacia”. A) Fóssil de espinho de peixe; B) Fóssil de peixe completo; C) Fóssil de parte de tronco de árvore. Coletados pelo Prof. Luiz Eduardo Anelli durante trabalhos de campo na área do geossítio (Fonte: Coleção didática do IGC/USP); D) Tronco fóssil (Família *Typhaceae*-*Typha tremembensis*); E) Folha fóssil (Família *Sapindaceae*). Coletados no “Jazigo Quiririm”. Fotos: Maria Judite Garcia.

Figure 5. Paleontological geosites of the “Basin opening” geological framework. A) Fishbone fossil; B) Complete fish fossil; C) Tree trunk fossils. Collected by Prof. Luiz Eduardo Anelli, during fieldwork in the geosite area (Source: IGC / USP didactic collection); D) Trunk fossil (Family: *Typhaceae*-*Typha tremembensis*); E) Leaf fossil (Family: *Sapindaceae*). Collected in the “Jazigo Quiririm”. Photos: Maria Judite Garcia.

3.2 Deposição e deformação neógena

Foram agrupados nesta categoria afloramentos relacionados à deformação da bacia e à sedimentação ocorrida após a sua abertura, totalizando cinco geossítios (Fig. 6A a H) (e Quadro 4).

Logo após a instalação da bacia, o campo de esforços sofreu uma mudança, passando de uma distensão E-W para uma compressão NW-SE, caracterizando assim um regime transcorrente sinistral. Durante este novo campo de esforços, pequenas bacias do tipo *pull-apart* se formaram sobre o Alto de Arujá, que separa as Bacias de São Paulo e Taubaté. O preenchimento sedimentar destas pequenas bacias compreende os depósitos de rios entrelaçados da Formação Itaquaquecetuba.

Este evento, caracterizado pela mudança dos referidos campos de esforços, também é bem marcado nas rochas do Grupo Taubaté, que foram falhadas e deformadas. Após este evento, foram depositadas as rochas da Formação Pindamonhangaba, que envolve depósitos de rios meandantes, demonstrando a instalação de um clima mais úmido.

Ao final do Neógeno, os campos de esforços mudaram novamente de direção, passando a uma compressão NE-SW, e assim foi estabelecido um regime transcorrente dextral. Este novo regime de esforços mudou a arquitetura da bacia com a reativação de falhas na região da borda, falhas transcorrentes e de altos estruturais importantes, como os de Guararema e Caçapava.

Quadro 4. Geossítios da categoria geológica “Deposição e deformação neógena”.
Chart 4. Geosites of the “Neogenic deposition and deformation” geological framework

Nome	Coordenadas (UTM)	Características principais	Unidade litoestratigráfica (Perrota <i>et al.</i> 2005)
Estrutura em Flor negativa de Tabuões (Fig. 6A)	446940 / 7453578	Falhas pós-sedimentares relacionadas com a extensão NW-SE	Formação Resende
Falha de empurrão da Zona de Cisalhamento de Pinheiros (Fig. 6B)	510882 / 7507780	Falha de empurrão associada a zonas de cisalhamento	Complexo Embu – Unidade Paragnáissica
Sistema de Falhas Normais da Formação Resende (Fig. 6C e D)	433334 / 7443665	Conjunto de falhas normais orientadas em NW-SE	Formação Resende
Captura fluvial de Guararema (Fig. 6E, Fe G)	391914 / 7414481	Mudança da direção do rio Paraíba de Sul, que passa a fluir de NW para NE. Exposição do embasamento da Bacia de Taubaté.	Complexo Embu – Unidade Paragnáissica
Hemi-gráben de Taubaté (Fig. 6H)	423048 / 7432411	Extenso afloramento descrito como um hemi-graben (Santos, 2011)	Formação Resende

Figura 6. Geossítios da categoria geológica “Deposição e deformação neógena”. A) Conjunto de falhas normais, pós-sedimentares, com mergulhos moderados a altos, direção NNE-SSW. Algumas das falhas provavelmente resultam da reativação de falhas transcorrentes mais antigas e apresentam estrutura em flor negativa; B) Contato tectônico entre o gnaisse do embasamento e os diamictitos da Formação Resende (em amarelo). Em preto pontilhado, contato erosivo; C) Lado esquerdo do afloramento, com indicação das falhas normais afetando as rochas da Formação Resende e colúvios quaternários; D) Lado direito do afloramento, com indicação das demais falhas; E) Localização do geossítio com indicação do cotovelo de captura. Fonte: *Google Earth*; F) Vista de cima do afloramento. Fonte: *Google Earth*; G) Detalhe do gnaisse pré-cambriano orientado para NE com cristais de feldspato bem desenvolvidos; H) Falhas rotacionais de baixo mergulho. Foto: Daniel do Valle.

Figure 6. Geosites of the "Neogenic deposition and deformation" geological framework. A) A set of normal, post-sedimentary faults with moderate to high dips and NNE / SSW direction. Some of the faults probably result from the reactivation of older transcurrent faults and present a negative flower structure; B) Tectonic contact between the gneiss of the basement and the diamictites of Resende Formation (in yellow). In dotted black, the erosive contact; C) The left side of the outcrop, indicating normal faults that affect the Resende Formation rocks and the Quaternary colluvium; D) The right side of the outcrop, with indication of the other faults; E) Location of the geosite with indication of the elbow of capture. Source: Google Earth; F) Top view of the outcrop. Source: Google Earth; G) Detail of NE-oriented pre-Cambrian gneiss with well-developed feldspar crystals; H) Rotational failures of low dive. Photo: Daniel do Valle.

3.3 Deformação quaternária e evolução do relevo

Esta categoria envolve quatro geossítios que caracterizam a fase neotectônica da Bacia de Taubaté (Fig. 7A a D) e um do tipo mirante, que se associa à evolução geomorfológica do relevo (Fig. 7E), bem marcada na região (Quadro 5).

Durante o Quaternário, os regimes de esforços compressivos NE-SW que se iniciaram no Plioceno perduraram por todo o Pleistoceno. A partir de então, com a instalação de um regime distensivo, de direção NW-SE, ocorreu uma nova mudança no campo de esforços. Esta fase é reconhecida pela colmatação fluvial, com a formação de depósitos coluviais e aluviais. Este evento é bem demonstrado por falhas normais nas rochas das formações Resende e Pindamonhangaba e nos depósitos coluviais *sin*-tectônicos.

Durante o Holoceno, instalou-se na bacia um regime compressivo de direção E-W, que continua ativo atualmente, como demonstrado em Assumpção (1998). Esta fase é bem caracterizada por falhas inversas, que deformam principalmente as rochas da Formação Pindamonhangaba.

Esta categoria engloba ainda um geossítio com interesse geomorfológico. O Pico de Itapeva corresponde a um mirante com 2025 m de altitude sustentado por rochas metassedimentares da Bacia de Taubaté, de onde se tem uma ampla visão da extensão de toda a bacia e da Serra do Mar, possibilitando também, em dias claros, a observação panorâmica de cidades do Vale do Paraíba. Ele também faz parte do inventário do Estado de São Paulo (Garcia *et al.*, 2017), sendo considerado um excelente ponto para observar e estudar a geomorfologia da região, bem como ilustrar a expressão geomorfológica dos processos geológicos pós-rifteamento.

Quadro 5. Geossítios da categoria geológica “Deformação quaternária e evolução do relevo”.
 Chart 5. Geosites of the “Quaternary deformation and landform evolution” geological framework

Nome	Coordenadas (UTM)	Características principais	Unidade litoestratigráfica (Perrota <i>et al.</i> 2005)
Falhas conjugadas da Formação Pindamonhangaba (Fig. 7A)	432425 / 7447390	Falhas normais conjugadas, relacionadas ao alto estrutural de Caçapava	Formação Pindamonhangaba
Falhas inversas da Formação Resende (Fig. 7B)	437631 / 7442638	Único exemplo de falhas inversas encontrado na área de estudo	Formação Resende
Falhas transversais da Formação Resende (Fig. 7C)	432475 / 7443045	Conjunto de falhas transversais interceptando arenitos	Formação Resende
Falha <i>sin</i>-sedimentar em colúvio da Formação Resende (Fig. 7D)	431511 / 7443260	Conjunto de falhas normais que afetam colúvios quaternários	Formação Resende
Pico de Itapeva (Fig. 7E)	446345 / 7482221	Visão panorâmica das escarpas da Serra do Mar, de feições da bacia e dos municípios adjacentes. O mirante é sustentado por metassedimentos de uma bacia neoproterozoica do tipo “ <i>pull-apart</i> ” (Cavalcante <i>et al.</i> , 1979)	Formação Pico de Itapeva

Figura 7. Geossítios da categoria geológica “Deformação quaternária e evolução do relevo”. A) Falhas normais conjugadas, relacionadas ao 3º evento de distensão da bacia; B) Duas falhas inversas; C) Vista geral do afloramento, com indicação das falhas e linhas de seixos; D) Falha *sin-sedimentar* que intercepta um colúvio quaternário; E) Vista panorâmica do Pico de Itapeva para o Vale do Paraíba, ao centro, e para a Serra do Mar, ao fundo.

Figure 7. Geosites of the "Quaternary deformation and landform evolution" geological framework. A) Conjugated normal faults, related to the 3rd event of extension of the basin; B) Two reverse faults; C) Outcrop overview, with indication of faults and pebbles lines; D) Sin-sedimentary fault that intercepts a quaternary colluvium; E) Panoramic view from the Itapeva Peak overlooking the Paraíba Valley, in the middle, and Serra do Mar, in the background.

4 Discussão dos resultados

4.1 Importância do inventário aplicado à Bacia de Taubaté: reflexões e perspectivas

Para desenvolver ferramentas voltadas à manutenção do meio ambiente, tanto biótico quanto abiótico, pressupõe-se uma reflexão acerca das bases ambientais, compreendendo a paisagem como um sistema de relações entre os aspectos físico-ambientais e as condições sociais. Neste contexto, no que concerne às potencialidades e limitações de uso de uma determinada área, o inventário do patrimônio geológico pode otimizar a gestão dos recursos geológicos, do meio ambiente e das paisagens naturais. Além disso, ele também pode contribuir com a preservação da memória geológica de sítios relevantes, especialmente daqueles considerados frágeis e que se encontram vulneráveis a ameaças naturais ou antrópicas, tais como os inventariados na região da Bacia de Taubaté.

De acordo com Lima (2008), a realização de um inventário sistemático envolve quatro etapas fundamentais: definição do que se pretende inventariar (patrimônio geológico, geomorfológico, geoturístico); qual o valor atribuído ao objeto do inventário (científico, educativo, estético); delimitação de uma área (parque, município, país); e qual a finalidade (uso turístico, educativo, divulgação). Com base nesta premissa, muitos países europeus têm realizado inventários nas últimas décadas como estratégias tanto para a conservação da natureza como para planos de uso e gerenciamento dos terrenos (Wimbledon *et al.*, 1999; García-Cortéz & Carcavilla Urquí, 2009; Brilha *et al.*, 2010).

No Brasil, Mansur (2010) relata um estudo de caso da realização do inventário utilizado na criação do Parque Estadual da Costa do Sol, importante polo turístico do Estado do Rio de Janeiro. O referido inventário foi elaborado como suporte para a geoconservação de sítios locais, que utilizam economicamente o turismo de base científica. A autora afirma que os esforços para preservação destas áreas, cuja gestão será compartilhada entre o Estado e os sete municípios envolvidos no projeto, estão embasados na Lei federal 9.985/2000, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), instrumento organizador das áreas naturais protegidas.

Para Fuertes-Gutiérrez *et al.*, (2016), por exemplo, o inventário direciona a escolha de geossítios para promoção de sua geoconservação por meio de planos de

gestão coerentes com a necessidade do local escolhido. Assim, de posse dos dados obtidos no inventário do patrimônio geológico espanhol, as autoras realizaram estudos de caso para identificar pontos de vulnerabilidade e propor meios de conservação aplicados a dois dos geossítios inventariados, localizados na região de La Rioja, norte da Espanha.

No referido trabalho, Fuertes-Gutiérrez *et al.*, (2016) realizaram um levantamento de possíveis ameaças que poderiam comprometer o valor científico dos geossítios, destacando atividades antrópicas decorrentes de obras de infraestrutura, mineração e uso público para fins turísticos, didáticos e educativos, por exemplo, além da própria ação do intemperismo. Por fim, foram propostos meios para a geoconservação de acordo com o risco de degradação dos geossítios, variando desde a criação de estruturas físicas para a proteção dos locais da ação do clima, como também registro fotográfico para monitoramento da perda do patrimônio. Cabe destacar que as ameaças descritas pelas autoras correspondem a fatores de impacto semelhantes àqueles observados na região da Bacia de Taubaté, foco deste trabalho.

Desta forma, a realização do presente inventário buscou identificar e seriar os locais considerados relevantes para a história geológica da região da bacia, abrangendo sítios essencialmente científicos, que podem ser usufruídos de forma didática, e um sítio com interesse geomorfológico, o qual tem o valor turístico agregado. Muitos dos potenciais geossítios não foram localizados ou se encontram totalmente intemperizados. Os demais ainda preservam suas feições e estruturas, embora estas feições se mostrem muito frágeis e com tendência a desaparecerem num curto intervalo de tempo (Fig. 8A e B).

Figura 8. Geossítio Falhas conjugadas da Formação Pindamonhangaba. A) Vista geral do afloramento na década de 1980. Fonte: Riccomini (1989); B) Esquema do afloramento indicando falhas em arranjo dominó e camada-sabão em grande escala, não mais visíveis (Riccomini, 1989).

Figure 8. Geosite Conjugated faults of Pindamonhangaba Formation. A) Outcrop overview in the 1980s. Source: Riccomini (1989); B) Outcrop sketch indicating domino faulting and the “soapy layer” (mudstone) on a large scale, no longer visible nowadays (Riccomini, 1989).

Dentre as ameaças antrópicas, as cavas de mineração representam fatores de risco tanto para o meio ambiente quanto para a geodiversidade (Fig. 9A e B). Em virtude da proximidade de grandes centros consumidores, aliado ao baixo custo de exploração, areias e argilominerais esmectíticos (utilizados na construção civil e por indústrias de fertilizantes) vêm sendo extraídos ativamente nos últimos 50 anos ao longo do rio Paraíba do Sul, tanto no leito como em suas planícies e, em menor proporção, nos sedimentos paleogenos. Além destas zonas de mineração, obras de infraestrutura são comuns na região e também afetam a geodiversidade local, demonstrando as mais variadas intervenções que ocorrem ao conjunto de paisagens que integram a área de estudo e como estas têm modificado a potencialidade dos elementos naturais (Fig. 10A a C).

Figura 9. Áreas de mineração de areia na região da Bacia de Taubaté. A) Cava de extração de areia invadindo área de preservação e destruindo mata ciliar próximo ao rio Paraíba do Sul; B) Desmonte hidráulico em Jacareí, às margens da Rod. Dutra. Notar a barreira de eucaliptos plantada ao longo da rodovia para ocultar as cavas. Fonte: <http://www.quimicosjc.org.br/pdfs/especiais/Cavas-de-areia-2012.pdf> (Acesso em: 02 set. 2017).

Figure 9. Sand mining areas in the Taubaté Basin region. A) Sand extraction pit invading a preservation area and destroying the ciliary forest near the Paraíba do Sul River; B) Hydroextraction in Jacareí, on the banks of Rod. Dutra. Notice the eucalyptus planted along the highway, making a visual barrier to hide the pit. Source: <http://www.quimicosjc.org.br/pdfs/especiais/Cavas-de-areia-2012.pdf> (Accessed on: 02 Sep. 2017).

Figura 10. Exemplos de geossítios e potenciais geossítios que estão na iminência de desaparecer ou que já não existem mais. A) Obras da construção do aeroporto de Caçapava – SP, o Aerovale, com indicação de dois geossítios (BT-09 e BT-10, em amarelo). Fonte: www.aerovale-cea.com.br/empreendimento (Acesso em: 11 ago. 2017); B) Afloramento com gretas de contração que foi destruído para construção de via de acesso para a cidade de Campos do Jordão – SP; C) Afloramento com arenitos estratificados que foi destruído para construção de estrada secundária na região de Tremembé – SP. Figuras B e C extraídas de Riccomini (1989).

Figure 10. Examples of geosites and potential geosites that are about to disappear or no longer exist. A) Construction site of the airport of Caçapava - SP, the Aerovale, with indication of two geosites (BT-09 and BT-10, in yellow). Source: www.aerovale-cea.com.br/empreendimento (Accessed on: Aug. 11, 2017); B) Contraction joints outcrop that was destroyed for construction of access road to the city of Campos do Jordão – SP; C) Stratified sandstones outcrop that was destroyed for construction of secondary road in the region of Tremembé - SP. Figures B and C: extracted from Riccomini (1989).

Ao mesmo tempo em que é importante pensar em estratégias para promover a geoconservação destas áreas, as atividades locais não podem ser interrompidas, visto que a sociedade necessita destes recursos que são disponibilizados pela geodiversidade, no caso da mineração, e de obras e melhorias de infraestrutura por conta do crescimento urbano e populacional. Isso pode acarretar na destruição de sítios significativos do ponto de vista geológico. No entanto, é possível pensar em estratégias para minimizar estes impactos, de modo a contribuir com a manutenção dos serviços ecossistêmicos prestados pela geodiversidade os quais, aplicados aos

geossítios da região, são classificados por Gray (2013) como “Serviços de Provisão”, responsáveis por disponibilizar bens materiais para a sociedade com valor econômico agregado.

Neste contexto, para o caso da atividade mineradora, fundamentar a importância da extração dos recursos de forma que ela seja sustentável, estabelecendo critérios e regras para exploração, é um meio de colaborar com a conservação de parte da geodiversidade da área afetada. Outra medida seria propor a criação de locais que favoreçam a difusão do conhecimento geocientífico, como ocorre com a “Pedreira do Valério”, no concelho de Arouca, em Portugal, e a Extrativa Santa Fé, no município de Tremembé, onde fica localizado o geossítio Fazenda Santa Fé (Fig. 11A e B).

Figura 11. Locais utilizados para divulgação do patrimônio geológico. A) Centro de Interpretação Geológica de Canelas, em Portugal. Notar os fósseis de trilobitas em placas expostas e que foram retiradas durante a atividade mineradora. Fonte: <http://www.cigc-arouca.com> (Acesso em: 11 jan. 2018); B) Parte do acervo da Extrativa Santa Fé, exibindo parte dos fósseis encontrados na mineração do folhelho da Formação Tremembé.

Figure 11. Sites used for the promotion of geological heritage. A) Center of Geological Interpretation of Canelas, Portugal. Note the trilobite fossils on the exposed slabs that were removed during mining. Source: <http://www.cigc-arouca.com> (Access: January 11, 2018); B) Part of the Extrativa Santa Fe collection, showing part of the fossils found during Tremembé Formation shales mining.

As imagens anteriores ilustram locais que contribuem com a conservação de parte do patrimônio geológico. Ambas as instituições correspondem a mineradoras ativas que exploram áreas onde ocorrem fósseis de inestimável valor em ardósias e folhelhos, respectivamente. Atualmente, no Geoparque Mundial da UNESCO de Arouca (Portugal), funciona o referido Centro de Interpretação Geológica de Canelas, um museu criado pela empresa mineradora e que preserva o patrimônio geológico encontrado durante a exploração de ardósia. A Extrativa Santa Fé criou recentemente uma área onde também divulga parte dos fósseis encontrados, além

de informações acerca da geologia do local. Ademais, as duas mineradoras permitem o acesso de pesquisadores às zonas de extração, possibilitando o estudo destas áreas de importante valor científico.

Para as atividades relacionadas às obras de infraestrutura, deve-se fomentar o ensino e a divulgação das geociências aliados à correta gestão destas áreas por parte das autoridades. Desta forma, após estudos adequados, estas atividades poderão ser planejadas com foco no ordenamento do território e gestão de recursos, promovendo, assim, uma boa relação entre pesquisa e o uso da geodiversidade, além de garantir o bem-estar da população.

Com relação às ameaças decorrentes de processos naturais, como intemperismo, faz-se necessário desenvolver estratégias de geoconservação com o intuito de diminuir estes impactos, tais como o uso de estruturas físicas que possam minimizar os danos causados pela ação da chuva, por exemplo (Fig. 12A e B). Estas medidas, no entanto, devem partir de entidades públicas ou privadas capazes de promover o gerenciamento destes locais, seja por meio da criação de infraestrutura, já citada, ou pelo cultivo da memória geológica, através do registro e catalogação dos sítios. Imagens de satélite e fotografias antigas podem ser utilizadas na criação de uma base de dados do patrimônio geológico, cuja perda pode ser calculada e comparada com imagens atuais. Neste exemplo, o uso de vídeos e imagens obtidas por meio de veículos aéreos não tripulados, os *drones*, podem facilitar a comparação e obtenção de dados mais precisos.

Figura 12. Coberturas contra os agentes de intemperismo em geossítios. A) Um dos geossítios da floresta petrificada do Geoparque Mundial da UNESCO da Ilha de Lesbos, Grécia. Fonte: <http://www.lesvosgeopark.gr> (Acesso em: 21 jan. 2018); B) Geossítio paleontológico *Montréal-du-Gers*, em Toulouse, França. Foto: José Brilha.

*Figure 12. Canopy against weathering in geosites. A) One of the geosites of the Petrified Forest of the Lesbos Island UNESCO Global Geopark, Greece. Source: <http://www.lesvosgeopark.gr> (Accessed on: January 21, 2018); B) Paleontological Geosite *Montréal-du-Gers* in Toulouse, France. Photo: José Brilha.*

5 Conclusões

O inventário da Bacia de Taubaté possui 18 geossítios selecionados a partir de uma lista preliminar de 38 potenciais locais de interesse. O método adotado visou à definição das categorias geológicas de modo a direcionar a identificação de geossítios durante a realização do inventário, classificando-os em um contexto pertinente à sua história geológica.

O conjunto de geossítios inventariados contempla diversos afloramentos que apresentam elevado interesse científico e didático, os quais são frequentemente utilizados em trabalhos de campo, principalmente por estudantes de Ciências da Terra. O inventário, neste contexto, serviu como base na identificação do patrimônio geológico, colaborando com a obtenção de informações que serão fundamentais à avaliação da relevância e da fragilidade inerente aos geossítios da bacia.

De acordo com os resultados demonstrados, 53% dos potenciais geossítios selecionados previamente não compõem o inventário final. Deste percentual, 27% correspondem a locais que não existem mais por consequência de atividades antrópicas que tem ocorrido gradativamente na área da bacia, embora o intemperismo também contribua com a perda do patrimônio geológico local, correspondendo 8% dos pontos eliminados.

Estes danos, no primeiro caso, resultam da alta demanda de obras de infraestrutura que ocorrem na região em virtude do crescimento urbano, normalmente feitas sem o planejamento adequado e que, por esse motivo, causam a destruição de muitos sítios geológicos. No segundo caso, concluiu-se que não existem maneiras de intervir na ação do clima, especialmente em afloramentos que se encontram expostos, o que implica que estes locais irão sofrer alterações significativas com o passar dos anos.

Torna-se fundamental, portanto, propor mecanismos para a geoconservação destes locais de interesse geológico, de modo a possibilitar estudos futuros destas áreas consideradas relevantes. Sugere-se que estas medidas sejam feitas por instituições capazes de promover o gerenciamento dos geossítios, seja por meio da criação de infraestrutura física capaz de minimizar os impactos da ação de agentes naturais, quando cabíveis, ou pelo registro e catalogação dos pontos que se encontram ameaçados, especialmente por atividades antrópicas. Estas ações

poderão ser viabilizadas após a avaliação destas áreas, onde os valores de risco de degradação deverão ser utilizados para hierarquizar a necessidade ou não de proteção de determinados geossítios.

Deste modo, sabendo que o conhecimento adequado do patrimônio geológico de uma dada região fornece subsídios para a gestão sustentável e uso correto dos recursos da natureza, espera-se que este inventário auxilie tanto na geoconservação de geossítios, quanto nas políticas públicas voltadas à gestão e ordenamento territorial da região da Bacia de Taubaté, de modo preservar a memória científica de afloramentos importantes e que registram parte da história geológica associada à evolução do Rifte Continental do Sudeste do Brasil.

Agradecimentos: Os autores agradecem: à Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade de São Paulo, por meio do Programa de Incentivo à Pesquisa, que permitiu a criação do Núcleo de Apoio à Pesquisa em Patrimônio Geológico e Geoturismo (GeoHereditas); à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado (Processo 88881.135227/2016-01); e às concessionárias CCR Nova Dutra e Ecopistas, ao DER-SP e Aerovale, por autorizarem a realização das atividades de campo. Nossa especial gratidão à pesquisadora Rachel Prochoroff, pela revisão e tradução do texto.

Referências bibliográficas

- Ab'Saber, A.N. 2003. *Os domínios da natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas*. São Paulo, Ateliê Editorial, 160p.
- Almeida, F.F.M. 1964. Os fundamentos geológicos do relevo paulista. *Boletim do Instituto Geográfico e Geológico*, 41: 169-263.
- Almeida, F.F.M. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 48(2): 15-26.
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2001. *Bacia do Rio Paraíba do Sul: livro da bacia*. Rio de Janeiro, ANA, 68p.
- Assumpção, M. 1998. Seismicity and stresses in Brazilian Passive Margin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(2): 160-169.
- Brilha, J. 2005. *Patrimônio geológico e geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica*. Braga, Palimage Editora, 190p.
- Brilha, J. 2016. Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage*, 8(2): 119-134.
- Brilha, J., Alcalá, L., Almeida, A., Araújo, A., Azeredo, A., Azevedo, M.R., Barriga, F., Brum da Silveira, A., Cabral, J., Cachão, M., Caetano, P., Cobus, A., Coke,

C., Couto, H., Crispim, J., Cunha, P.P., Dias, R., Duarte, L.V., Dória, A., Falé, P., Ferreira, N., Ferreira Soares, A., Fonseca, P., Galopim de Carvalho, A., Gonçalves, R., Granja, H., Henriques, M.H., Kullberg, J.C., Kullberg, M.C., Legoinha, P., Lima, A., Lima, E., Lopes, L., Madeira, J., Marques, J.F., Martins, A., Martins, R., Matos, J., Medina, J., Miranda, R., Monteiro, C., Moreira, M., Moura, D., Neto Carvalho, C., Noronha, F., Nunes, J.C., Oliveira, J.T., Pais, J., Pena dos Reis, R., Pereira, D., Pereira, P., Pereira, Z., Piçarra, et al. 2010. O inventário nacional do património geológico: abordagem metodológica e resultados. *E-Terra*, 18(1):1-4.

Bruschi, V.M. & Cendrero, A. 2005. Geosite Evaluation: Can We Measure Intangible Values? *Italian Journal of Quaternary Sciences*, 18(1): 293-306.

Cavalcante, J., Cunha, H.C.S., Chierregatti, L.A., Kaefer, L.Q., Rocha, J.M., Daitx, E.C., Coutinho, M.G.N., Yamamoto, K., Drumond, J., Rosa, D.B. & Ramalho, R. 1979. *Projeto Sapucaí, estado de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais*. São Paulo, DNPN, 299p.

Fernandes, F. L. & Chang, H.K. 2001. Modelagem gravimétrica da Bacia de Taubaté - Vale do Rio Paraíba do Sul, leste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19(1): 131-144.

Fernandes, F.L. & Chang, H.K. 2003. Arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté – SP. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 9., 2003, Búzios, *Volume único*, p. 367-370.

Fernandes, F.L. 1993. *Arcabouço estrutural e evolução da Bacia de Taubaté - SP*. Ouro Preto, 147p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.

Ferrari, A.L. 2001. *Evolução Tectônica do Graben da Guanabara*. São Paulo, 449p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geologia Sedimentar, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Florenzano, T.G. & Csordas, S.M. 1993. *Mapa geomorfológico da Região do Médio Vale do Paraíba e Litoral Norte do Estado de São Paulo*. São José dos Campos, Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais, escala 1:250.000.

Fuertes-Gutiérrez, I. & Fernández-Martínez, E. 2010. Geosites inventory in the Leon Province (Northwestern Spain): A tool to introduce geoheritage into regional environmental management. *Geoheritage*, 2: 57-75.

Fuertes-Gutiérrez, I., García-Ortiz, E. & Fernández-Martínez, E. 2016. Anthropogenic threats to geological heritage: characterization and management: a case study in the dinosaur tracksites of La Rioja (Spain). *Geoheritage*, 8: 135-153.

Garcia, M.G.M., Brilha, J., Lima, F.F., Vargas, J.C., Pérez-Aguillar, A., Alves, A., Campana, G.A.C., Duleba, W., Faleiros, F.M., Fernandes, L.A., Fierz, M.S.M., Garcia, M.J., Janasi, V.A., Martins, L., Raposo, M.I.B., Ricardi-Branco, F., Ross, J.L.S., Sallum Filho, W., Souza, C.R.G., Bernardes-de-Oliveira, M.E.C., Neves, B.B.B, Campos Neto, M.C., Christofolletti, S.R., Henrique-Pinto, R.,

- Lobo, H.A.S., Machado, R., Passarelli, C.R., Perinotto, J.A.J., Ribeiro, R.R. & Shimada, H. 2017. The Inventory of Geological Heritage of the State of São Paulo, Brazil: Methodological Basis, Results and Perspectives. *Geoheritage*, 1: 01-20.
- García-Cortéz, A. & Carcavilla Urquí, L. 2009. Documento metodológico para la elaboración del inventario español de lugares de interés geológico (IELIG). Disponível em: <<http://www.igme.es/patrimonio/novedades/METODOLOGIA%20IELIG%20web.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2017.
- Gonggrijp, G.P. 2000. Planificación y Gestión para la Geoconservación. In: Baretino D., Wimbledon W.A.P. & Gallego Y.E. (Ed.). *Patrimonio Geológico: Conservación y Gestión*. Madrid, Spain, p. 31-49.
- Gray, M. 2004. *Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature*. Londres, John Wiley & Sons, 434p.
- Gray, M. 2005. Geodiversity and Geoconservation: what, why and how? *The George Wright Forum*, 22(3): 4-12.
- Gray, M. 2013. *Valuing and conserving abiotic nature*. Londres, John Wiley & Sons, 508p.
- Gray, M., Gordon, J.E. & Brown, E.J. 2013. Geodiversity and the ecosystem approach: the contribution of geoscience in delivering integrated environmental management. *Proceedings of the Geologist's Association*, 124(4): 659-73.
- Henriques, M.H., Reis, R.P., Mota, T. & Brilha, J. 2011. Geoconservation as an Emerging Geoscience. *Geoheritage*, 3(1): 117-128.
- Lima, F.F. 2008. *Proposta Metodológica para a Inventariação do Patrimônio Geológico Brasileiro*. Braga, 94p. Dissertação de Mestrado, Escola de Ciências, Universidade do Minho.
- Mansur, K.L. 2010. Ordenamento Territorial e Geoconservação: Análise das Normas Legais Aplicáveis no Brasil e um Caso de Estudo no Estado do Rio de Janeiro. *Geociências*, 29(1): 237-349.
- Mansur, K.L., Rocha, A.J.D., Pedreira, A.J., Schobbenhaus, C., Salamuni, E., Erthal, F.L.C., Piekarz, G.F., Winge, M., Nascimento, M.A.L. & Ribeiro, R.R. 2013. Iniciativas Institucionais de valorização do patrimônio geológico no Brasil. *Boletim Paranaense de Geociências*, 70(1): 2-27.
- Mezzalira, S. 1989. *Os fósseis do estado de São Paulo*. São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Geológico, 141p.
- Mochiutti, N.F., Guimarães, G.B. & Melo, M.S. 2011. Os Valores da Geodiversidade na Região de Piraí da Serra, Paraná. *Geociências*, 30(4): 651-668.

- Moura, P., Garcia, M.G.M., Brilha, J. & Amaral, W.S. 2017. Conservation of geosites as a tool to protect geoheritage: the inventory of Ceará Central Domain, Borborema Province - NE/Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 89: 2625-2645.
- Pereira, P.J.S. 2006. *Património geomorfológico: conceptualização, avaliação e divulgação. Aplicação ao Parque Natural de Montesinho*. Braga, 370p. Tese de Doutorado, Escola de Ciências, Universidade do Minho.
- Pereira, R.G.F.A. 2010. *Geoconservação e desenvolvimento sustentável na Chapada Diamantina (Bahia - Brasil)*. Braga, 318p. Tese de Doutorado, Escola de Ciências da Universidade do Minho.
- Perrotta, M.M., Salvador, E.D., Lopes, R.C., D'Agostinho, L.Z., Peruffo, N., Gomes, S.D., Sachs, L.L.B., Meira, V.T., Garcia, M.G.M. & Lacerda Filho, J.V. 2005. *Mapa geológico do estado de São Paulo*. São Paulo, Serviço Geológico do Brasil, escala 1:750.000.
- Poiraud, A., Chevalier, M., Claeysen, B., Biron, P. & Joly, B. 2016. From geoheritage inventory to territorial planning tool in the Vercors massif (French Alps): Contribution of statistical and expert cross approaches. *Applied Geography*, 71: 69-82.
- Reynard, E. & Brilha, J. 2018. *Geoheritage: assessment, protection and management*. Amsterdam, Elsevier, 450p.
- Riccomini, C. 1989. *O rift continental do sudeste do Brasil*. São Paulo, 256p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Riccomini, C. 1993. Origem, evolução e inversão da Bacia do Pico de Itapeva, Neoproterozóico - Cambriano, São Paulo, Brasil. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DEI NEOPROTEROZÓICO-CAMBRICO DE LA CUENCA DEL PLATA, 1., 1993, La Paloma. *Resumenes Extensos*, v. 1(16), s/p.
- Riccomini, C., Appi, C.J., Freitas, E.L. & Arai, M. 1987. Tectônica e sedimentação no sistema de rifts continentais da Serra do Mar (Bacias de Volta Redonda, Resende, Taubaté e São Paulo). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA RJ-ES, 1., 1987, Rio de Janeiro. *Anais do 1º Simpósio de Geologia RJ-ES*, v. 1, p. 253-298.
- Riccomini, C., Sant'anna, L.G. & Ferrari, A.L. 2004. Evolução geológica do rifte continental do sudeste do Brasil. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R. & Brito-Neves, B.B. (Ed.). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 383-406.
- Santos, D.V.L. 2011. *Tectônica rúptil na porção central da Bacia de Taubaté: Deformação por falhas dos sedimentos cenozoicos e do embasamento adjacente*. Rio Claro, 62p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-

Stanley, M. 2000. Geodiversity. *Earth Heritage*, 14: 15-18.

Vidal, A.C., Fernandes, F.L. & Chang, H.K. 2004. Distribuição dos arenitos da Bacia de Taubaté – SP. *Geociências*, 2(23): 55-66.

Wimbledon, W.A.P. 1996. Geosites - A new conservation initiative. *Episodes*, 19(3): 87-88.

Wimbledon W.A.P., Andersen S., Cleal, C.J., Cowie, J.W., Erikstad, L., Gonggrijp, G.P., Johansson, C.E., Karis, L.O. & Suominen, V. 1999. Geological World Heritage: GEOSITES: a global comparative site inventory to enable prioritisation for conservation. *Memorie Descritive della Carta Geologica d'Italia*, 54: 45–60.

Zouros, N.C. 2007. Geomorphosite assessment and management in protected areas of Greece. Case study of the Lesvos island- coastal geomorphosites. *Geographica Helvetica: Swiss Journal of Geography*, 62(3): 169-180.

6. AVALIAÇÃO DA PERDA DO VALOR CIENTÍFICO DE GEOSSÍTIOS POR FATORES NATURAIS E ANTRÓPICOS: EXEMPLO APLICADO À BACIA DE TAUBATÉ – SP

Artigo em preparação

Resumo: Esse trabalho discute a abordagem metodológica utilizada na quantificação do patrimônio geológico da Bacia de Taubaté, sudeste do estado de São Paulo. A região se constitui num local-chave no entendimento da história geológica pós-Gondwana, abrangendo 18 geossítios que registram a evolução tectônica da bacia, mas que se encontram sob-risco de degradação decorrente, principalmente, de atividade antrópica. A quantificação dos geossítios foi realizada por meio da plataforma GEOSSIT. A partir dos valores obtidos para relevância científica e do risco de degradação foi possível identificar as ameaças e avaliar a perda do valor científico do patrimônio geológico local com base no estado de conservação dos geossítios. Os resultados da quantificação confirmaram a relevância científica e o alto risco de degradação do patrimônio geológico, visto que a maioria deles obteve valores significativos nesses quesitos. Além disso, a quantificação corroborou o potencial de uso educativo e turístico apresentado por dois geossítios, o que lhes agregou ainda mais valor. Pretende-se que a avaliação da perda do valor científico propicie a criação de medidas que minimizem as ameaças a que estão submetidos estes locais de interesse geológico, principalmente no que se refere à vulnerabilidade antrópica. Dessa forma, será possível promover a inserção dos geossítios nas políticas públicas para ordenamento territorial, viabilizando a conservação de parte desse patrimônio, que registra a história geológica do Rifte Continental do Sudeste do Brasil.

Palavras-chave: Risco de degradação; Quantificação; Patrimônio Geológico; Bacia de Taubaté.

AVALIAÇÃO DA PERDA DO VALOR CIENTÍFICO DE GEOSSÍTIOS POR FATORES NATURAIS E ANTRÓPICOS: EXEMPLO APLICADO À BACIA DE TAUBATÉ - SP

Fernanda Coyado Reverte^{1,2}, Maria da Glória Motta Garcia¹, José Brilha²

(1) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Brasil

(2) Instituto de Ciências da Terra, Universidade do Minho, Braga, Portugal

E-mails: fernanda.reverte@usp.br; mgmgarcia@usp.br; jbrilha@dct.uminho.pt

1. INTRODUÇÃO

O aumento da exploração de recursos naturais associado à ocupação desordenada de um determinado território vem afetando cada vez mais os elementos da geodiversidade, colocando em risco recursos que não são renováveis em nossa escala de tempo. A procura por bens naturais aumenta à medida que as cidades vão se desenvolvendo, promovendo uma série de danos ambientais. Desta forma, o conhecimento do patrimônio geológico de uma dada região é essencial para a gestão sustentável de seus recursos, pois ele permite diagnosticar ameaças e fornece indicações acerca das limitações para o uso e ocupação das áreas envolvidas.

Uma forma de sistematizar o conhecimento científico acerca do patrimônio geológico se dá por meio da realização de inventários sistemáticos, cujos dados podem servir como base para avaliação quantitativa e qualitativa dos geossítios, contribuindo, desta forma, com a avaliação da perda do valor científico, estabelecendo critérios para a geoconservação destas áreas.

Por esse motivo, inventários têm sido realizados em diversos países, abrangendo desde áreas delimitadas, como um parque nacional, por exemplo, até toda a extensão de um determinado país (Carcavilla Urquí *et al.*, 2009; Carcavilla-Urquí, 2012; Brilha *et al.*, 2010; Garcia *et al.*, 2018). O inventário do patrimônio geológico português, por exemplo, contempla 326 geossítios selecionados com base, exclusivamente, no valor científico (Brilha *et al.*, 2011). Para os autores, a avaliação da vulnerabilidade associada ao valor científico dos geossítios é fundamental no estabelecimento de prioridades voltadas ao desenvolvimento de uma estratégia nacional de geoconservação, especialmente se o inventário abranger

elevada quantidade de geossítios.

Neste sentido, é fundamental avaliar o risco de degradação dos geossítios na realização de inventários, principalmente quando a ameaça potencial decorre de atividade antrópica. Nesse caso, é possível propor meios para tentar preservar parte do patrimônio, visto que os sítios geológicos podem ser incluídos em políticas de gerenciamento, colaborando com o ordenamento territorial.

Inúmeros exemplos ao redor do mundo demonstram a degradação, com possibilidade de destruição total, de importantes sítios geológicos por decorrência de atividade antrópica (Kazanci, 2012; Grecu e Iosif, 2014; Fuertes-Gutiérrez *et al.* 2015; Lima *et al.*, 2017; AbdelMaksoud, *et al.*, 2018). Donaldson (2009), por exemplo, descreve a ocorrência de megaestromatólitos em uma área urbana da cidade de Almonte, na província de Ontário, no Canadá, que está sendo destruída para construção de moradias. Como não há legislação que proteja este tipo de patrimônio, o autor sugeriu a entidades canadenses que propusessem aos proprietários dos terrenos a preservação de pelo menos uma parte do afloramento, em troca de subsídios como redução de impostos, por exemplo. Outro exemplo relatado por Donaldson (2009) se refere à ocorrência de estromatólitos ao longo da rodovia 417 que seriam destruídos para duplicação da via. No entanto, após reuniões entre entidades envolvidas na geoconservação do patrimônio geológico e os Ministérios do Transporte e do Meio Ambiente de Ontário, ficou acordado que os blocos de estromatólitos seriam retirados para serem expostos em museus e instituições de ensino que se dispuseram a armazenar e expor ao público, tais como o *Museum of Civilization* e as Universidades de Waterloo e Ottawa.

Para os casos associados estritamente ao intemperismo, a proteção é mais difícil, especialmente quando aplicadas a sítios que ocupam grandes áreas. Locais constituídos por rochas sedimentares submetidas à intemperismo químico são naturalmente frágeis. Quando expostas a intervenções urbanísticas tornam-se ainda mais vulneráveis. A região da Bacia de Taubaté, foco deste trabalho, se insere neste contexto, visto que sua geodiversidade se encontra ameaçada tanto pela ação do intemperismo como por atividades antrópicas.

Localizada na porção leste do estado de São Paulo, a bacia ocupa uma área aproximada de 2400 km², abrangendo onze municípios. Instalada durante o Eoceno/Oligoceno, faz parte de um conjunto de bacias pertencentes ao Rifte Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989), relacionada à fase tardia do

evento de ativação tectônica da Plataforma Sul Americana. Por esse motivo, apresenta afloramentos de elevado interesse científico, muitos dos quais são utilizados de forma didática em atividades de campo por instituições de ensino superior.

A região se constitui num local chave para o entendimento da história geológica do pós-Gondwana, além de ser uma das mais importantes áreas para estudos paleontológicos do sudeste brasileiro, exibindo litotipos, estruturas e fósseis de inestimável valor. No entanto, essa riqueza vem se perdendo gradativamente em virtude da extrema vulnerabilidade e fragilidade dos afloramentos, ameaçados tanto por obras de infraestrutura e atividades de mineração, como também pela ação do intemperismo. A degradação das rochas é visível em um curto período de tempo e afetam de maneira definitiva feições importantes por registrarem a evolução sedimentar e tectônica da bacia.

Com o intuito de diagnosticar as ameaças e o risco de degradação do patrimônio geológico inventariado na região (Reverte *et al.*, 2019), foi realizada a quantificação dos 18 geossítios locais através da plataforma GEOSSIT. Segundo Romão e Garcia (2017), o método tem sido o mais utilizado na temática da geoconservação para avaliação do patrimônio geológico brasileiro, sendo disponibilizado de forma gratuita pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

Neste contexto, considerando o estado atual de conservação dos geossítios e o risco de degradação quantificado no GEOSSIT, foi possível avaliar a perda do valor científico do patrimônio geológico da bacia considerando fatores intrínsecos ao geossítio, como o intemperismo, mas, principalmente, as ameaças antrópicas. Esta avaliação indicou se os elementos geológicos que condicionaram a escolha do local como sendo relevante ainda são visíveis a ponto de manter seu *status* enquanto geossítio, ou seja, a manutenção do seu valor científico.

O alto risco de degradação das exposições rochosas da bacia representa um desafio à gestão de seus geossítios. Neste sentido, avaliar a perda do valor científico representa uma forma de priorizar ações para a geoconservação dos locais considerados relevantes, onde a quantificação representa uma importante iniciativa para identificação e avaliação das ameaças que afetam o patrimônio geológico local e pode contribuir com o aumento do interesse do poder público nas questões ligadas à gestão e ordenamento territorial de modo sustentável.

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização e aspectos físicos

A Bacia de Taubaté está localizada na porção leste do estado de São Paulo em uma área altamente urbanizada do chamado Vale do Paraíba (Fig. 1).

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo com destaque para a localização da Bacia de Taubaté.

Inserida no Planalto Atlântico Paulista, entre as serras do Mar e da Mantiqueira, a bacia apresenta um sistema de montanhas que constitui a feição orogênica mais destacada da borda atlântica do continente Sul-Americano (Almeida e Carneiro, 1998). Ab'Saber (2003) classificou o relevo local como Domínio dos Mares de Morros do Brasil Tropical Atlântico, onde ocorrem colinas de topos convexos com altitudes entre 600 e 700 metros.

A região é cortada por uma série de rios que provém das serras do Mar e Mantiqueira, desaguando no rio Paraíba do Sul, cuja bacia hidrográfica representa uma das mais importantes do país. Esta bacia ocupa uma área de aproximadamente

55 mil km² entre os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. A região possui também dois sistemas de aquíferos: Cristalino e Taubaté, sendo este o que apresenta maior potencial hídrico, pois é formado por rochas do Grupo Taubaté as quais, por serem mais porosas, favoreceram o armazenamento de água pluvial ao longo dos anos.

No que se refere aos recursos minerais, na Bacia de Taubaté, além da água subterrânea, predominam minerais industriais (representados pela areia e argilominerais) e minerais energéticos, embora outras ocorrências tenham sido descritas, tais como os depósitos quartzíticos e rochas graníticas, lavrados como brita, cantaria, revestimento ou ornamentação (Cabral Junior *et al.*, 2001). No entanto, as extrações de areia, seguida das argilas, correspondem aos principais potenciais minerais da bacia.

2.2 Contexto Geológico

Geologicamente, a Bacia de Taubaté faz parte de um conjunto de bacias pertencentes ao Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), uma feição tectônica de idade cenozoica que se apresenta como uma faixa estreita e deprimida, com pouco mais de 900 km de extensão (Riccomini, 1989). A unidade é a maior depressão tectônica do referido rifte, apresentando seção sedimentar com cerca de 850 m de espessura, distribuída em 170 km de extensão por 25 km de largura (Riccomini *et al.*, 1987; Riccomini, 1989; Fernandes & Chang, 2003; Vidal *et al.*, 2004).

Segundo o modelo tectono-sedimentar proposto por Riccomini (1989), entre o Eoceno e o Oligoceno a região entrou em processo tectônico distensivo, seguido do preenchimento sedimentar, que foi dividido pelo autor em duas etapas: a primeira, *sin*-tectônica ao rifte, é representada pela deposição do Grupo Taubaté, um expressivo pacote tectono-sedimentar composto pelas Formações Resende, Tremembé e São Paulo; e a segunda, posterior à tectônica diastrófica, envolve a deposição das Formações Itaquaquecetuba e Pindamonhangaba, além de depósitos aluviais e coluviais (Fig. 2).

Figura 2. Litoestratigrafia e evolução tectono-sedimentar do segmento central do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Inventário do patrimônio geológico

A região da bacia é caracterizada por eventos geológicos relacionados à evolução do RCSB, associados ao estágio final de fragmentação do supercontinente Gondwana que culminou na formação do Atlântico Sul, resultando em ocorrências que representam parte da geodiversidade do Vale do Paraíba. O local se destaca ainda por constituir uma das mais importantes áreas para estudos paleontológicos do sudeste brasileiro, apresentando riqueza geológica que está se perdendo gradativamente em virtude da extrema vulnerabilidade de suas rochas constituintes, afetadas tanto pela ação antrópica, quanto pelo clima.

Em virtude da importância científica atribuída à região e, como forma de promover a geoconservação destas áreas relevantes ao contexto de evolução

tectônica da bacia, foi realizado o inventário do patrimônio geológico local priorizando o valor científico dos elementos da geodiversidade (Reverte *et al.*, 2019). Os geossítios selecionados registram feições significativas à compreensão da evolução deste segmento do sudeste brasileiro, responsáveis pela configuração da paisagem atual.

Com base em revisão bibliográfica, consulta a docentes e pesquisadores que conhecem a região, e trabalhos de campo, foram selecionados 18 geossítios (Fig. 3) distribuídos em três categorias geológicas distintas: 1) Abertura da bacia; 2) Deposição e deformação neógena; e 3) Deformação quaternária e evolução da paisagem (Tabela 1).

Figura 3: Localização dos geossítios da Bacia de Taubaté.

Tabela 1: Síntese dos geossítios da Bacia de Taubaté (Reverte et al., 2019).

CATEGORIAS GEOLÓGICAS		GEOSSÍTIOS		CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS
ABERTURA DA BACIA	Embasamento pré-cambriano; Formação do <i>hemigráben</i> ; Deposição do Grupo Taubaté; Ocorrências fossilíferas.	G1	Injectitos da Formação Resende (Fig. 4A)	Injeções de diques clásticos de direção NE em argilito da Formação Resende
		G2	Falhas <i>sin-sedimentares</i> da Formação Resende	Falhas relacionadas à instalação da bacia, contemporâneas à deposição da Formação Resende
		G3	Falhas da Formação São Paulo	Falha lítrica deformando as rochas da Formação São Paulo
		G4	Exposição sedimentar da Formação Resende	Arenitos e conglomerados mal selecionados da Formação Resende
		G5	Leques proximais da Formação Resende	Zona de contato entre as rochas do embasamento e da Formação Resende
		G6	Rochas graníticas do embasamento da bacia	Granitos do embasamento
		G7	Fazenda Santa Fé (Fig. 4B)	Microfósseis, icnofósseis, moluscos, artrópodes, peixes, anfíbios, répteis, aves e mamíferos
		G8	Jazigo Quiririm	Importante ocorrência de fósseis de angiospermas dicotiledôneas
DEPOSIÇÃO E DEFORMAÇÃO NEOGENA	Compressão de direção NE-SW; Nova compressão para NW-SE; Deposição da Formação Pindamonhangaba	G9	Estrutura em Flor negativa de Tabuões (Fig. 4C)	Falhas pós-sedimentares relacionadas com a extensão NW-SE
		G10	Falha de empurrão da Zona de Cisalhamento de Pinheiros (Fig. 4D)	Falha de empurrão associada a zonas de cisalhamento
		G11	Sistema de Falhas Normais da Formação Resende	Conjunto de falhas normais orientadas em NW-SE
		G12	Captura fluvial de Guararema	Mudança da direção do Rio Paraíba de Sul, que passa a fluir de NW para NE. Exposição do embasamento da Bacia de Taubaté.
		G13	Hemi-gráben de Taubaté	Extenso afloramento descrito como um hemi-graben)
DEPOSIÇÃO QUATERNÁRIA E EVOLUÇÃO DO RELEVO	Nova extensão para NW-SE; Deposição dos colúvios; Atual compressão E-W; Elementos geomorfológicos.	G14	Falhas conjugadas da Formação Pindamonhangaba	Falhas normais conjugadas, relacionadas ao alto estrutural de Caçapava
		G15	Falhas inversas da Formação Resende (Fig. 4E)	Único exemplo de falhas inversas encontrado na área de estudo
		G16	Falhas transversais da Formação Resende	Conjunto de falhas transversais interceptando arenitos
		G17	Falha sin-sedimentar em colúvio da Formação Resende	Conjunto de falhas normais que afetam colúvios quaternários
		G18	Pico de Itapeva (Fig. 4F)	Visão panorâmica das escarpas da Serra do Mar, de feições da bacia e dos municípios adjacentes. Formado por metassedimentos de uma bacia neoproterozoica do tipo “pull-apart”

Figura 4: Geossítios selecionados da Bacia de Taubaté por categoria geológica: A) Geossítio Injectitos da Formação Resende; B) Geossítio Fazenda Santa Fé, localizado em uma área de extração de folhelho. No detalhe, fóssil de peixe completo encontrado no local; C) Geossítio Estrutura em flor negativa de Tabuões; D) Geossítio Falha de empurrão da Zona de Cisalhamento de Pinheiro. Contato tectônico entre o gnaiss do embasamento e os diamictitos da Formação Resende (em amarelo). Em preto pontilhado, contato erosivo; E); Geossítio falhas inversas da Formação Resende. F) Vista panorâmica do geossítio Pico de Itapeva para o Vale do Paraíba, ao centro, e para a Serra do Mar, ao fundo. Local muito utilizado para turismo e recreação.

3.2 Avaliação quantitativa

Para a quantificação dos 18 geossítios foi utilizada a plataforma GEOSSIT. Idealizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), o GEOSSIT é um sistema online para registro e quantificação automática dos pontos de interesse geológico, que funciona como uma ferramenta para padronização do cadastramento dos

geossítios que irão compor um banco de dados nacional (Rocha *et al.*, 2016). A proposta do GEOSSIT se baseou no método de Brilha (2016) para quantificar o valor científico, o risco de degradação e o potencial de uso turístico e educativo dos geossítios, somado ao método de Garcia-Cortés e Carcavilla-Urquí (2009) para definir as prioridades de proteção dos locais submetidos à avaliação.

Assim, foram considerados os critérios associados ao valor científico, que apresenta sete parâmetros e ao risco de degradação, com cinco parâmetros (Tabela 2). O potencial de uso educativo (PUE) e turístico (PUT) não foram avaliados neste trabalho.

Tabela 2: Critérios, valores possíveis e pesos para a avaliação do valor científico (A) e Risco de degradação (B).

CRITÉRIO A: VALOR CIENTÍFICO (VC)		VALOR	PESO(%)
A1	Representatividade	0, 1, 2 ou 4	30
A2	Local-tipo		20
A3	Conhecimento científico		5
A4	Integridade		15
A5	Diversidade geológica		5
A6	Raridade		15
A7	Limitações de uso		10
TOTAL:			100
CRITÉRIO B: RISCO DE DEGRADAÇÃO (RD)		VALOR	PESO(%)
B1	Deterioração de elementos geológicos	0, 1, 2, 3 ou 4	35
B2	Proximidade a áreas/atividades com potencial para causar degradação		20
B3	Proteção Legal		20
B4	Acessibilidade		15
B5	Diversidade populacional		10
TOTAL:			100

De acordo com a plataforma, os pontos de interesse geológico podem ser classificados em geossítios ou sítios da geodiversidade. Conforme consta na página inicial do *site*, são geossítios os locais que apresentam valor científico ≥ 200 e sítios de geodiversidade aqueles com valores < 200 . Estes sítios são ainda categorizados quanto à relevância: internacional (somente geossítios com VC ≥ 300); nacional (geossítios com $200 \leq VC < 300$ e sítios de geodiversidade com VC < 200 com PUE ou PUT ≥ 200); e regional (somente sítios de geodiversidade com VC < 200 com PUE ou PUT < 200).

Quanto ao risco de degradação, os valores obtidos para geossítios ou sítios

de geodiversidade podem ser classificados em três níveis: baixo ($RD \leq 200$), médio ($200 < RD \leq 300$) e alto ($300 < RD \leq 400$).

O GEOSSIT também permite estabelecer prioridades de proteção aos locais de interesse geológico em função do valor do risco de degradação somado ao valor científico, potencial de uso educativo ou potencial de uso turístico. O resultado desta soma classifica a prioridade de proteção em quatro intervalos: i) Longo Prazo ($PPC \leq 300$); ii) Médio Prazo ($300 < PPC \leq 550$); iii) Curto Prazo ($550 < PPC \leq 750$); e iv) Urgente ($PPC > 750$). Por fim, é possível proceder com a avaliação da prioridade de proteção global dos sítios por meio da média aritmética simples entre os resultados obtidos para o valor científico, o de potencial de uso educativo e o de potencial de uso turístico.

3.3 Avaliação da perda do valor científico

Com base nos valores obtidos pela quantificação do risco de degradação, foi realizada a análise da vulnerabilidade e da fragilidade dos geossítios perante atividades antrópicas, as quais, associadas ao intemperismo, configuram as principais ameaças à integridade desses locais de importante interesse geológico.

Para a avaliação, considerou-se o estado de conservação atual dos geossítios por meio de observação de suas principais feições durante os trabalhos de campo. Com base na proposta de Lima (2012), para designação dos aspectos, e de Wimbledon *et al.* (2004), para a conservação destes aspectos, foram identificadas os principais elementos do sítio de interesse geológico, responsáveis pela designação do local como geossítio. Em seguida procedeu-se à avaliação do estado de conservação destes elementos classificando-os em *favoráveis* e *desfavoráveis*, o que possibilitou avaliar a perda do valor científico do patrimônio geológico da Bacia de Taubaté.

4. RESULTADOS

4.1 Quantificação e avaliação do valor científico e do risco de degradação

Todos os sítios geológicos da Bacia de Taubaté foram inventariados como

geossítios por apresentarem importante valor científico associado à evolução do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989; Reverte *et al.*, 2019). (Tabela 3).

O valor científico atribuído aos geossítios variou entre 120 e 300 (para um máximo de 400), sendo que três deles obtiveram valores menores que 200: G3, G7 e G8. Neste caso, por apresentarem $VC < 200$, o GEOSSIT considera estes locais de interesse geológico como sítios de geodiversidade. O menor valor científico foi atribuído ao G3 ($VC = 120$), classificado pela plataforma como sítio de geodiversidade por não existir publicações científicas sobre o local, descrito apenas em mapeamentos regionais (Parâmetro A3 – Conhecimento Científico). O maior valor, de $VC = 300$, foi atribuído a dois geossítios, G12 e G18, atribuindo-lhes relevância internacional. Os demais geossítios apresentaram relevância nacional, com exceção daqueles considerados sítios de geodiversidade pela plataforma, que foram classificados em nacional (G7) e Regional/Local (G3 e G8).

Tabela 3: Quantificação do patrimônio geológico. N = Nacional; R = Regional; L = Local; e I = Internacional.

		GEOSSÍTIOS POR CATEGORIA GEOLÓGICA																	
		ABERTURA DA BACIA								DEPOSIÇÃO E DEFORMAÇÃO NEOGENA					DEPOSIÇÃO QUATERNÁRIA E EVOLUÇÃO DO RELEVO				
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16	G17	G18
VALOR CIENTÍFICO	A1	4	4	2	4	4	4	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	A2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A3	1	0	0	0	0	0	4	4	4	0	0	4	0	0	0	0	0	0
	A4	2	2	2	2	2	1	4	2	2	2	4	4	4	2	1	2	2	4
	A5	2	2	2	4	2	2	1	1	2	2	2	4	2	2	2	2	2	4
	A6	4	4	0	2	4	4	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	A7	2	2	2	2	2	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4
	VC	245	240	120	220	240	245	195	165	260	240	270	300	270	240	225	240	240	300
RISCO DE DEGRADAÇÃO	Relev.	N	N	R/L	N	N	N	N	R/L	N	N	N	I	N	N	N	N	N	I
	B1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	1
	B2	0	1	4	2	1	4	4	3	4	1	4	4	1	1	1	4	4	4
	B3	0	0	0	0	0	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	B4	4	0	0	0	4	3	4	0	0	0	0	4	0	0	2	4	4	4
	B5	3	3	1	3	1	3	2	2	3	3	3	1	3	3	3	3	3	2
	RD	290 M	190 B	230 M	210 M	170 B	335 A	320 A	260 M	250 M	170 B	250 M	220 M	190 B	190 B	220 M	310 A	310 A	275 M

Justificando o porquê de esses três sítios terem sido classificados como sítios de geodiversidade pela plataforma, os geossítios paleontológicos G7 (VC = 195) e G8 (VC = 165) tiveram valores baixos em virtude dos critérios de Representatividade (A1) — visto que existem outras ocorrências desse tipo na área de estudo — e Local-tipo (A2) — pois este parâmetro não se aplica aos sítios em questão. O G3 recebeu VC = 120 por conta dos critérios A2, A6 e, principalmente, o A3, que corresponde ao Conhecimento Científico. Nesse caso, apesar do geossítio registrar eventos importantes da história geológica local, ele não consta em publicações científicas, apenas em mapeamentos regionais, o que lhe diminui o valor científico.

Com relação ao risco de degradação (RD), os valores variaram entre 170 e 335 (para um máximo de 400), sendo que cinco deles obtiveram RD baixo. Dos 18 geossítios, 16 obtiveram pontuação máxima no critério B1 (Deterioração dos elementos geológicos), que tem o maior peso na quantificação do RD, indicando que todos os elementos geológicos podem ser deteriorados. No entanto, houve predominância de RD médio em decorrência de pontuação zero (que indica “não se aplica”) atribuída a muitos dos geossítios nos critérios B3 e B4 (Proteção Legal e Acessibilidade).

Quatro geossítios foram classificados com RD altos: G6; G7; G16 e G17, todos eles ameaçados, principalmente, por atividade antrópica. Dentre eles, o G6 obteve o maior valor, com RD = 335, em virtude dos parâmetros B1, B2 (Proximidade a áreas/atividades com potencial para causar degradação) e B3. A síntese da quantificação encontra-se expressa na Figura 5.

Figura 5: Resultados da quantificação dos geossítios para valor científico (VC) e risco de degradação (RD).

4.2 Quantificação e avaliação da prioridade de proteção

De acordo com o GEOSSIT, os valores obtidos para prioridade de proteção podem atingir no máximo 800 pontos, sendo 400 possíveis do risco de degradação somado aos outros 400 possíveis do valor científico, educativo ou turístico.

A pontuação da prioridade de proteção científica (PPC) variou entre 350 e 580 pontos, sendo que 16 geossítios foram classificados com prioridade em médio prazo e apenas dois com prioridade em curto prazo: os geossítios Captura Fluvial de Guararema e Pico de Itapeva (Tabela 4).

Neste trabalho também não foram consideradas as avaliações para a prioridade de proteção de interesse educativo (PPE) e prioridade de interesse turístico (PPT).

As prioridades de proteção para a gestão adequada do patrimônio geológico são definidas com base nos resultados da quantificação dos geossítios inseridos nesse patrimônio. Ao atribuir valor, definir uso potencial e possíveis ameaças, é viável estabelecer estratégias para a geoconservação de um determinado geossítio.

Os geossítios G6 e G18 foram os que obtiveram maior valor para PPC. No primeiro caso, o valor decorre do alto valor obtido para RD. No segundo, embora o RD tenha resultado em risco médio, o alto valor científico atribuído ao geossítio

(classificado como sendo de relevância internacional) fez com que a PPC fosse classificada curto prazo.

Tabela 4: Avaliação das prioridades de proteção científica (PPC) dos geossítios da Bacia de Taubaté.

GEOSSÍTIOS		PPC	PRAZO
ABERTURA DA BACIA	G1	535	Médio
	G2	430	Médio
	G3	350	Médio
	G4	430	Médio
	G5	410	Médio
	G6	580	Curto
	G7	515	Médio
	G8	425	Médio
DEPOSIÇÃO E DEFORMAÇÃO NEOGENA	G9	510	Médio
	G10	410	Médio
	G11	520	Médio
	G12	520	Médio
	G13	460	Médio
DEPOSIÇÃO QUATERNÁRIA E EVOLUÇÃO DO RELEVO	G14	430	Médio
	G15	445	Médio
	G16	550	Médio
	G17	550	Médio
	G18	575	Curto

4.3 Perda do valor científico com base no risco de degradação

Wimbledon *et al.* (2004) se utiliza dos aspectos e subaspectos para classificar o estado de conservação dos geossítios em *favorável* e *desfavorável*, sendo que cada um destes parâmetros são divididos em níveis: *conservado*, *recuperado* ou *em recuperação*, para os aspectos *favoráveis*; e *sem modificação* ou *em declínio* quando seu estado for considerado *desfavorável*.

Para a bacia, foram identificados os principais aspectos dos geossítios para classificar o estado de conservação atual indicando se os elementos que atribuíram valor científico a esses locais ainda são visíveis. Assim, foram considerados os mesmos parâmetros de classificação de Wimbledon *et al.* (2004), adaptando os níveis de acordo com o risco de degradação obtido pelos geossítios na quantificação pelo GEOSSIT, conforme segue (Tabela 5):

Tabela 5: Classificação do estado de conservação dos geossítios com base no risco de degradação (RD): alto (A), médio (M) ou baixo (B).

CLASSIFICAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO			
RD	Parâmetro	Nível	Descrição
B/M	Favorável	Conservado	Aspectos plenamente visíveis.
		Razoável	Aspectos em processo de degradação, mas visíveis.
A	Desfavorável	Em declínio	Aspectos muito intemperizados e/ou na iminência de destruição.

Os geossítios considerados *favoráveis* podem apresentar risco de degradação baixo (B) ou médio (M) e dois níveis de classificação, com base no estado de conservação observado no momento da avaliação: *conservado* ou *razoável*. Ao serem considerados *conservados* será mantido o valor científico dos geossítios, enquanto os sítios considerados *razoáveis* necessitarão de medidas de geoconservação, sugerindo-se, para ambos níveis, a realização de avaliação periódica. Os locais com risco de degradação altos (A) são considerados *desfavoráveis* por estarem em declínio, o que configura, neste trabalho, os sítios na iminência de perderem o seu valor científico. (Fig. 6).

Figura 6: Avaliação da perda do valor científico (VC) com base no estado de conservação e no risco de degradação (RD) apresentado pelos geossítios.

A classificação de todos os geossítios encontra-se expressa na Tabela 6.

Tabela 6: Classificação do estado e níveis de conservação dos geossítios com base no Risco de Degradação (RD) – Baixo (B), Médio (M) ou Alto (A)

GEOSSÍTIOS		RD	ASPECTO	CLASSIFICAÇÃO	NÍVEL
G1	Injectitos da Formação Resende	M	Injectito	Favorável	Conservado
G2	Falhas <i>sin-sedimentares</i> da Formação Resende	B	Falha que delimita o contato tectônico entre o biotita-xisto do embasamento pré-cambriano e a Fm. Resende	Favorável	Razoável
G3	Falhas da Formação São Paulo	M	Falha lítrica relacionada à distensão NW-SE durante a instalação da bacia, deformando rochas da Fm. São Paulo	Favorável	Razoável
G4	Exposição sedimentar da Formação Resende	M	Lentes com conglomerado clasto suportado intercalado com arenito mais fino	Favorável	Conservado
G5	Leques proximais da Formação Resende	B	Contato entre depósitos de leques aluviais da Formação Resende (fácies proximal) e rochas do embasamento pré-cambriano	Favorável	Razoável
G6	Rochas graníticas do embasamento da bacia	A	Embasamento granítico aflorante	Desfavorável	Em declínio
G7	Fazenda Santa Fé	A	Variedade de fósseis	Desfavorável	Em declínio
G8	Jazigo Quiririm	M	Macrofósseis vegetais	Favorável	Razoável
G9	Estrutura em Flor negativa de Tabuões	M	Estrutura em flor	Favorável	Razoável
G10	Falha de empurrão da Zona de Cisalhamento de Pinheiros	B	Contato entre diamictitos da Fm. Resende com embasamento sobreposto	Favorável	Razoável
G11	Sistema de Falhas Normais da Formação Resende	M	Conjunto de falhas normais	Favorável	Razoável
G12	Captura fluvial de Guararema	M	“Cotovelo” de captura fluvial	Favorável	Conservado
G13	Hemi-gráben de Taubaté	B	Estruturas em hemi-grábens e horstes	Favorável	Razoável
G14	Falhas conjugadas da Formação Pindamonhangaba	B	Falhas conjugadas decorrentes do Alto Estrutural de Caçapava	Favorável	Razoável
G15	Falhas inversas da Formação Resende	M	Falhas inversas	Favorável	Razoável
G16	Falhas transversais da Formação Resende	A	Falhas transversais que indica o contato entre a Fm. Resende e colúvios quaternários	Desfavorável	Em declínio
G17	Falha <i>sin-sedimentar</i> em colúvio da Formação Resende	A	Falha <i>sin-sedimentar</i> que intercepta um colúvio quaternário.	Desfavorável	Em declínio
G18	Pico de Itapeva	M	Mirante de onde se observa o Rife	Favorável	Conservado

5. DISCUSSÃO

5.1 Risco de degradação: fragilidade e vulnerabilidade dos geossítios

O risco de degradação de um geossítio corresponde à probabilidade desse local ser danificado ou destruído, acarretando na perda total ou parcial dos elementos que fizeram com que assim fosse designado (Carcavilla *et al.*, 2007). Nesse contexto, a maior parte da litologia da Bacia de Taubaté é formada por rocha sedimentar, embora existam afloramentos onde ainda é possível observar granitos e gnaisses do embasamento. Por esse motivo, os geossítios da região são naturalmente sensíveis, por estarem submetidos à ação de intemperismo severo.

A sensibilidade de um geossítio, segundo García-Ortiz *et al* (2014), está diretamente relacionada ao seu tamanho em área e, principalmente, sua constituição litológica, refletindo num conjunto de características intrínsecas que são capazes de potencializar danos à sua integridade frente à ação de agentes externos, sejam eles antrópicos ou naturais. Para as autoras, a sensibilidade de um sítio pode ser afetada pelo seu uso público e está atrelada a dois conceitos centrais: fragilidade e vulnerabilidade.

A fragilidade representa a forma de sensibilidade relacionada ao desgaste natural de um geossítio que possui baixa resistência à deterioração em virtude, principalmente, de suas características intrínsecas. Nesses locais ocorrem processos de erosão e intemperismo de forma mais acelerada, onde aspectos biológicos, como colonização vegetal e/ou animal, também podem contribuir com os danos. A vulnerabilidade, por sua vez, é a forma de sensibilidade associada à possibilidade de um geossítio ser deteriorado por fatores externos sejam eles decorrentes da dinâmica interna da Terra – como vulcanismo e terremotos que causam grandes danos em maior escala e que não se podem controlar – ou de atividade antrópica – como mineração e construção civil, por exemplo, cujos impactos podem ser minimizados se houver planejamento García-Ortiz *et al* (2014).

Pensando na geoconservação dessas áreas, muitos autores têm proposto diferentes estratégias para minimização do risco de degradação com foco na vulnerabilidade dos sítios geológicos frente às ações antrópicas (Kazanci, 2012; Grecu e Iosif, 2014; Lima *et al.*, 2017; AbdelMaksoud, *et al.*, 2018) . Lima (2012)

elencou uma série de aspectos e subaspectos inerentes a dois geossítios do geoparque Açores, muito visitados por turistas de diversos países. Com base nesses aspectos, a autora identificou as características geológicas, os valores e as ameaças, propondo um plano de gestão e monitoramento para manutenção e uso adequado dos geossítios. Fuertes-Gutiérrez *et al.* (2015) realizaram um levantamento de possíveis ameaças que poderiam comprometer o valor científico de um geossítio localizado em La Rioja, norte da Espanha. As autoras destacaram como principais fatores de danos à integridade do local as ameaças antrópicas decorrentes de obras de infraestrutura, mineração e uso público do sítio para fins turísticos, didáticos e educativos.

Nesse contexto, o patrimônio geológico da Bacia de Taubaté pode ser classificado como frágil, visto que seus geossítios se encontram em processo acelerado de deterioração natural. Esse processo é passível de ser identificado e medido dentro da escala humana de tempo, ao invés do lento desgaste natural que se processa em uma escala geológica mais ampla (Fuertes-Gutiérrez *et al.*, 2013). Dependendo da ameaça que pode comprometer um geossítio, ele pode ser totalmente ou parcialmente destruído, sendo necessário, nesse último caso, avaliar se o dano não afetou as características que justificaram seu valor científico, considerando os aspectos principais e possíveis subaspectos, quando houver.

Muitos dos potenciais geossítios inicialmente selecionados para compor o inventário da Bacia de Taubaté não existem mais, não podem ser acessados ou estão altamente intemperizados, corroborando os altos valores obtidos para o risco de degradação. Muitos deles, que eram utilizados como exemplos didáticos, foram destruídos para dar espaço a melhorias de infraestrutura como consequência da expansão urbana local. Já para alguns dos locais que ainda existem e que foram descritos como geossítios, o risco de degradação é real tanto no que se refere à ação do intemperismo, mas, principalmente, por decorrência de atividade antrópica (Reverte *et al.*, 2019).

5.2 Avaliação de potenciais ameaças e sugestões de minimização de impactos

Para facilitar a identificação das potenciais ameaças a que estão submetidos

os geossítios, o patrimônio geológico da bacia foi dividido em cinco grupos que apresentam características semelhantes no que se refere às ameaças e medidas de proteção: i) locais situados em cortes de estrada; ii) locais que se encontram em propriedade particular; iii) geossítios que apresentam algum tipo de proteção; iv) geossítio em área de mineração; e v) geossítios em áreas extensas (a partir de 1 hectare).

Avaliando os fatores de risco de degradação, foram identificadas as potenciais ameaças e propostas algumas medidas que podem minimizar impactos antrópicos e naturais aos grupos de geossítios, quando aplicável (Fig. 7). Cabe destacar que a falta de informação sobre a importância da geoconservação representa uma das principais ameaças aos geossítios.

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grupo I – Geossítios em corte de estrada: G2, G3, G4, G5, G9, G10, G11, G13, G14 e G15. ▪ Ameaças: Intemperismo; Expansão urbana; Falta de informação. ▪ Medidas de proteção: Delimitação da área; Comunicar às concessionárias responsáveis pela via; Catalogação: registro fotográfico; <i>scanner</i> 3D. ▪ Exemplo da foto: Exposição sedimentar da Fm. Resende (G4).
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grupo II – Geossítios em propriedade particular: G1, G8, G12, G16, G17 e G18. ▪ Ameaças: Intemperismo; Obras de infraestrutura; Vegetação; Pisoteamento; Lixo; Falta de informação. ▪ Medidas de proteção: Delimitação da área; Sinalização; Retirar vegetação; Evitar pisoteamento; Comunicar proprietário para propostas de geoconservação (construção de estrutura física, por exemplo); Catalogação. ▪ Exemplo da foto: Jazigo Quiririm (G8).
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grupo III – Geossítio com regime de proteção: ▪ Ameaças: Intemperismo; Vegetação; Pisoteamento; Lixo; Falta de informação. ▪ Medidas de proteção: Delimitação da área; Sinalização; Retirar vegetação; Evitar pisoteamento; Comunicar prefeitura para propostas de geoconservação; Catalogação. ▪ Exemplo da foto: Rochas graníticas do embasamento (G6).
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grupo IV – Geossítio em área de mineração de folhelho: ▪ Ameaças: Extração das rochas até exaustão; Falta de informação. ▪ Medidas de proteção: Delimitação de parte do afloramento para preservação da coluna estratigráfica e fósseis; Sinalização; Comunicar proprietário para ações de geoconservação. ▪ Exemplo da foto: Fazenda Santa Fé (G7).
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grupo V – Geossítios em áreas extensas: G12 e 16. ▪ Ameaças: Intemperismo; Falta de informação. ▪ Medidas de proteção: Valorização por meio de ações de geoconservação; Sinalização; Catalogação. ▪ Exemplo da foto: Captura Fluvial de Guararema (G12).

Figura 7: Potenciais ameaças e propostas de conservação com base na vulnerabilidade e fragilidade dos geossítios da Bacia de Taubaté.

Os geossítios do Grupo I tendem a desaparecer com o tempo, visto que se encontram submetidos a ação direta do intemperismo e, por estarem em corte de estrada, dificilmente serão adotadas medidas que incluam a proteção física dessas áreas, como a instalação de toldos e coberturas. Para eles, uma forma de manter a memória geológica, é por meio de registros fotográficos.

Para Grupo II, localizados em propriedade particular, os geossítios G16 e G17 estão inseridos na área onde será construído o aeroporto de Caçapava e, por esse motivo, estão seriamente comprometidos à destruição. Segundo dados do projeto (obtidos de forma oral durante trabalho de campo), o G17 seria derrubado por estar na zona da pista de pouso enquanto o G16, por estar na entrada do empreendimento, ainda não havia a certeza de que o afloramento seria mantido ou não. Para o G1 e o G8 seria importante contatar os proprietários para estabelecer propostas para geoconservação, visto que nestes casos eles estão expostos à ação do clima.

O Grupo III, representado pelo G6, embora se localize na margem do rio Paraíba do Sul, constituindo uma Área de Proteção Permanente (APP) pela Lei 12.651/2012 do Código Florestal, não possui controle de acesso, o que facilita seu uso indevido por parte da população. Por esse motivo, ele se encontra extremamente degradado por fatores intrínsecos e antrópicos. No entanto, é passível de se proceder com as medidas de proteção indicadas por meio da conscientização da população e através de ações da prefeitura do município.

O Grupo IV, correspondente ao G7, está localizado em uma área de mineração ativa de folhelho da Formação Tremembé, onde ocorrem fósseis do Oligoceno. A Extrativa Santa Fé permite o acesso de pesquisadores às zonas de extração, desde que agendado previamente. Além disso, devido a grande procura do local para trabalhos de campo, a empresa criou um local para receber esse público, onde divulga parte dos fósseis encontrados e outras informações acerca da geologia do local (Fig. 8). Embora essa atitude também promova a conservação de parte elementos geológicos, quando houver exaustão do material explorado os alunos não saberão de que maneira esses fósseis eram encontrados. Por isso seria importante tentar expor parte da coluna estratigráfica no próprio local que eles criaram, conforme proposto.

Figura 8: Parte do acervo da Extrativa Santa Fé, exibindo fósseis e outras informações sobre a geologia local.

O Grupo V, correspondentes aos geossítios G12 e G16, representa os locais cuja tipologia é classificada por Fuertes-Gutiérrez e Fernández-Martínez (2010) como áreas extensas, incidindo baixa fragilidade e vulnerabilidade. Apresentam, também, algumas peculiaridades no que se refere ao uso potencial, visto que são locais que possuem certa infraestrutura e são utilizados para fins turísticos (Reverte e Garcia, 2017; 2018).

5.3 Avaliação da perda do valor científico

Até que ponto um local de interesse geológico pode ser considerado um geossítio? Para responder essa questão é essencial analisar, prioritariamente, se os elementos da geodiversidade que atribuíram valor científico ao local mantiveram os aspectos relevantes que o classificaram como geossítio. Para isso devem-se considerar as características intrínsecas, a fragilidade e a vulnerabilidade a que estão submetidos os geossítios de modo a estabelecer critérios para avaliar o estado de conservação desejável para essas áreas.

Segundo Lima (2012), os aspectos correspondem aos elementos da geodiversidade de maior interesse e importância de um sítio geológico, àqueles que justificam a escolha desse local como geossítio. Os subaspectos, por sua vez, são representados pelos elementos secundários, derivados dos aspectos, e podem variar em quantidade de acordo com a área delimitada pelo sítio e a diversidade geológica por ele apresentado. Cabe ressaltar que nem todo geossítio irá apresentar subaspectos relevantes.

Conforme descrito anteriormente, considerou-se o estado de conservação dos aspectos como o principal condicionante na determinação da manutenção ou perda

do valor científico dos geossítios. Assim, com base na classificação exposta na Tabela 6, os geossítios que mantiveram ou estão na iminência de perderem seu valor científico estão distribuídos conforme Figura 9.

Figura 9: Classificação do valor científico dos geossítios.

Assim, considerando o estado de conservação atual dos geossítios, temos:

- *Favoráveis/conservados*: como o valor científico dos geossítios foi mantido, sugere-se apenas avaliação periódica para a manutenção do estado de conservação dos aspectos dos geossítios;

- *Favoráveis/razoáveis*: como todos os geossítios que estão nesta classificação situam-se em cortes de estrada, aplicam-se as medidas de geoconservação sugeridas ao Grupo I (Figura 6), seguido de avaliação periódica.

- *Desfavoráveis*: são os geossítios que estão na iminência de perderem seu valor científico, como os G16 e G17, que serão destruídos para construção de obras de infraestrutura.

Cabe destacar que esta classificação pode ser modificada quando os sítios forem reavaliados, caso ainda não tenham sido destruídos.

6. CONCLUSÕES

A avaliação quantitativa comprovou a relevância científica dos geossítios, visto que 73% deles apresentam relevância nacional. A Captura Fluvial de Guararema e o Pico de Itapeva foram os únicos a apresentarem relevância internacional.

Com relação ao risco de degradação, a quantificação confirmou que a maioria

dos geossítios encontra-se ameaçada principalmente por atividade antrópica, embora a ação do clima também contribua de forma significativa com o estado de conservação dos geossítios, especialmente daqueles que se localizam em cortes de estrada.

A divisão dos geossítios em grupos facilitou a identificação de ameaças e proposição de medidas de proteção considerando a fragilidade e a vulnerabilidade dos sítios. Nesse sentido, a possibilidade de deterioração dos elementos geológicos foi fator determinante na avaliação da perda do valor científico. Nessa avaliação, considerou-se o estado de conservação, onde 78% dos aspectos geológicos relevantes se encontram em estado “razoável” – visto que as feições, apesar de visíveis, encontram-se intemperizadas – ou em “declínio” – correspondendo a geossítios que estão na iminência de serem destruídos. Apenas cinco geossítios foram considerados conservados, apresentando menor potencial para risco de degradação.

Sabendo que a região é afetada por intemperismo e que esse processo é natural, não há como impedir a deterioração da maioria dos geossítios que estão em cortes de estrada. Para eles, a catalogação fotográfica, imagens de satélite, *laser scanner* 3D e uso de *drones* seria uma maneira de conservar seus registros. Os geossítios considerados em situação de declínio estão ameaçados, principalmente, por atividade antrópica decorrente de obras que já se iniciaram. Para os geossítios conservados, espera-se que sejam incluídos em planos de gestão de modo que se mantenha o seu estado atual.

Assim, espera-se que os resultados desse trabalho possam contribuir com a inclusão dos geossítios em ações de planejamento e ordenamento territorial, colaborando com a manutenção do valor científico aliado ao uso adequando dessas áreas, promovendo a conservação do patrimônio geológico às futuras gerações.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pela bolsa de mobilidade acadêmica do Programa PDSE/Processo nº 88881.135227/2016-01 concedida à primeira autora.

8. REFERENCIAS

Ab'Saber, A. N. 2003. Os Domínios de Natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas. São Paulo, Ateliê Editorial, 160p.

AbdelMaksoud, K.M., Al-Metwaly, W.M., Ruban, D.A., Yashalova, N.N. 2018. Geological heritage under strong urbanization pressure: El-Mokattam and Abu Roash as examples from Cairo, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 141: 86-93.

Almeida, F.F.M.; Carneiro, C.D.R. 1998. Origem e Evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências* p. 135-150.

Brilha, J.; Alcalá, L., Almeida, A., Araújo, A., Azeredo, A., Azevedo, M.R., Barriga, F., Brum da Silveira, A., Cabral, J., Cachão, M., Caetano, P., Cobus, A., Coke, C., Couto, H., Crispim, J., Cunha, P.P., Dias, R., Duarte, L.V., Dória, A., Falé, P., Ferreira, N., Ferreira Soares, A., Fonseca, P., Galopim de Carvalho, A., Gonçalves, R., Granja, H., Henriques, M.H., Kullberg, J.C., Kullberg, M.C., Legoinha, P., Lima, A., Lima, E., Lopes, L., Madeira, J., Marques, J.F., Martins, A., Martins, R., Matos, J., Medina, J., Miranda, R., Monteiro, C., Moreira, M., Moura, D., Neto Carvalho, C., Noronha, F., Nunes, J.C., Oliveira, J.T., Pais, J., Pena dos Reis, R., Pereira, D., Pereira, P., Pereira, Z., Piçarra, J., Pimentel, N., Pinto de Jesus, A., Prada, S., Prego, A., Ramalho, L., Ramalho, M., Ramalho, R., Relvas, J., Ribeiro, A., Ribeiro, M.A., Rocha, R., Sá, A., Santos, V., Sant'Ovaia, H., Sequeira, A., Sousa, M., Terrinha, P., Valle Aguado, B., Vaz, N. 2010. O inventário nacional do patrimônio geológico: abordagem metodológica e resultados. In: CONGRES-SO NACIONAL DE GEOLOGIA, 8, Braga, Anais..., 2010, p. 1-4.

Brilha J.; Pereira P. ; Pereira D. . Assessment of geological heritage: scientific value and vulnerability of geosites with national relevance in Portugal. In: International Symposium on Geosite Management, 2011, Savoie. Abstract Booklet, 2011. p. 9-9.

Brilha, J. 2016. Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage*, 8(2): 119-134.

Cabral Junior, M.; Motta, J.F.M.; Mello, I.S.C.; Tanno, L.C.; Sintoni, A.; Salvador, E.D.; Chierregatti, L.A. 2001. Recursos minerais do Fanerozóico do estado de São Paulo. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 20, n. 1, p. 105-159.

Carcavilla, L., López-Martínez, J., Durán, J.J., 2007. Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 360.

Carvalho, A.M.A., Vidal, A.C., Chang, H.K. 2011. Delimitação do embasamento da Bacia de Taubaté. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, v. 11, n.1, p. 19-32.

Fernandes, F.L. & Chang, H.K. 2003. Arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté – SP. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 9., 2003, Búzios, Volume único, p. 367-370.

Fuertes-Gutiérrez, I., Fernández-Martínez, E., García-Ortiz, E. 2013. Propuesta de términos en castellano sobre conceptos relacionados con el riesgo de degradación del patrimonio geológico. In: Vegas J, Salazar A, Díaz-Martínez E, Marchán C (eds), Patrimonio geológico, un recurso para el desarrollo. Cuadernos del Museo Geominero, 15. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid: 195–206.

Fuertes-Gutiérrez, I. & Fernández-Martínez, E. 2010. Geosites inventory in the Leon Province (Northwestern Spain): a toll to introduce geoheritage into regional environmental management. *Geoheritage*, 2: 57-75.

Fuertes-Gutiérrez, I., García-Ortiz, E., Fernández-Martínez, E. 2015. Anthropic threats to geological heritage: characterization and management: a case study in the dinosaur tracksites of La Rioja (Spain). *Geoheritage*, 8: 135-153.

Garcia, M.G.M.; Brilha, J.; Lima, F.F.; Vargas, J.C.; Perez-Aguilar, A.; Alves, A.; Campanha, G.A.; Duleba, W.; Faleiros, F.M.; Fernandes, L.A.; *et al.* 2018. The inventory of geological heritage of the State of São Paulo, Brazil: methodological basis, results and perspectives. *Geoheritage*, 10(2), 239-258.

García-Cortés, A., Carcavilla, L.U. 2009. Documento metodológico para la elaboración del Inventario Español de lugares de interés geológico (IELIG). 2. ed. Madrid, Instituto Geológico y Minero de España, 64 p. Versão de 18-07-2013.

García-Ortiz, E., Fuertes-Gutiérrez, I., Fernández-Martínez, E. 2014. Concepts and terminology for the risk of degradation of geological heritage sites: fragility and natural vulnerability, a case study. *Proceedings of the Geologists' Association*, v. 125, 463-479.

Grecu, F., Iosif, D. 2014. The Geosites from Danube Defile in Romania. The Vulnerability to Touristic Activities. *GeoJournal of Tourism and Geosites*, 2 (14), 178-184.

Kazanci, N. 2012. Geological background and three vulnerable geosites of the Kızılcahamam–Çamlıdere Geopark Project in Ankara, Turkey. *Geoheritage* 4 (4), 249-261.

Lima, A., Nunes, J.C., Brilha, J. 2017. Monitoring of the Visitors Impact at - Ponta da Ferraria e Pico das Camarinhas- Geosite (São Miguel Island, Azores UNESCO Global Geopark, Portugal). *Geoheritage* , v. 9, p. 495-503.

Lima, A.F.G. 2012. Estratégias de monitorização do geossítio "Ponta da Ferraria e Pico das Camarinhas", ilha de S. Miguel: Contributo para a gestão sustentada do património geológico do Geoparque Açores. Dissertação (Mestrado em Mestrado em Património Geológico e Geoconservação) - Universidade do Minho., 220p.

Reverte, F.C., Garcia, M.G.M. 2017. Pico de Itapeva: exemplo de Geossítio Geomorfológico do inventário da Bacia de Taubaté. In: I Simpósio de Geodiversidade e Geoconservação do Estado de Goiás, Goiânia, v. 1. p. 73-77.

Reverte, F.C., Garcia, M.G.M. 2018. Captura Fluvial de Guararema – SP:

Geossítio interdisciplinar da Bacia de Taubaté, Rifte Continental do Sudeste do Brasil. In: VIII GeoSciEd 2018 – the 8th Quadrennial Conference of the International Geoscience Education Organisation (IGEO), 2018, Campinas. VIII GeoSciEd 2018 e VIII Ensino GEO.

Reverte, F.C., Garcia, M.G.M., Brilha, J., & Moura, T.T. 2019. Inventário de geossítios como instrumento de gestão e preservação da memória geológica: exemplo de geossítios vulneráveis da Bacia de Taubaté (São Paulo, Brasil). *Pesquisas em Geociências*, 46(1), e0779. doi:<https://doi.org/10.22456/1807-9806.93252>

Riccomini, C. 1989. O rift continental do sudeste do Brasil. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 256 p.

Riccomini, C., Appi, C. J., Freitas, E. L., Arai, M. 1987. Tectônica e sedimentação no sistema de rifts continentais da Serra do Mar (Bacias de Volta Redonda, Resende, Taubaté e São Paulo). In: Simpósio de Geologia RJ-ES, 1., 1987. *Anais do 1º Simpósio de Geologia RJ-ES*, v. 1, p.253-298.

Riccomini, C., Grohmann, C.H., Sant'anna, L.G., Hiruma, S.T. 2010. A captura das cabeceiras do Rio Tietê pelo Rio Paraíba do Sul. In: Modenesi-Gauttieri, M.C.; Bartorelli, A.; Mantesso-Neto, V.; Carneiro, C.D.R.; Lisboa, M.B.A.L.. (Org.). *A Obra de Aziz Nacib Ab'Sáber*. São Paulo: Becca, 2010, v. , p. 157-169.

Rocha, A.J.D., Lima, E., Schobbenhaus, C. 2016. Aplicativo GEOSSIT – nova versão. In: *Anais do 48º Congresso Brasileiro de Geologia*, Porto Alegre – RS.

Romão, R.M.M., Garcia, M.G.M. 2017. Initiatives of Inventory and Quantification of Geological Heritage in Brazil: an overview. *Anuário do Instituto de Geociências*, 40(2): 250-265.

Santos, D.V.L. 2011. Tectônica rúptil na porção central da Bacia de Taubaté: Deformação por falhas dos sedimentos cenozoicos e do embasamento adjacente. Rio Claro, 62p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

Vidal, A.C., Fernandes, F.L., Chang, H.K. 2004. Distribuição dos arenitos da Bacia de Taubaté – SP. *Geociências UNESP*, 2(23): 55-66.

Wimbledon, W., Barnard, A., Peterken, A. 2004. Geosite management – a widely applicable, practical approach. In: Parkes MA (ed) *Natural and cultural landscapes – the geological foundation*. Royal Irish Academy, Dublin, pp. 187–192

7. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AOS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS PRESTADOS PELA GEODIVERSIDADE EM ÁREAS ALTAMENTE URBANIZADAS: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO TAUBATÉ, BRASIL

Artigo em revisão, submetido ao periódico: “Environmental Science and Policy”

RESUMO: Este trabalho apresenta um método para identificar, avaliar e quantificar as perdas da oferta de serviços ecossistêmicos prestados pela geodiversidade, utilizando como estudo de caso a região da Bacia de Taubaté, uma porção altamente urbanizada do sudeste do estado de São Paulo, Brasil. Nosso método considera não apenas a análise qualitativa dos aspectos abióticos, mas também o contexto histórico e cultural, no qual os elementos da geodiversidade são fundamentais para o desenvolvimento da economia local. O método é baseado em: i) Avaliação qualitativa e definição de seis variáveis da geodiversidade — do inglês, *Essential Geodiversity Variables (EGVs)*, utilizadas como base para a identificação de 53 serviços ecossistêmicos distribuídos em quatro funções: regulação, suporte, provisionamento e cultural; ii) Definição de categorias de uso do solo com base em dois mapas de uso e ocupação do solo elaborados para comparar a transformação ocorrida na região entre 1986 e 2016; iii) Quantificação e avaliação dos impactos na oferta de serviços ecossistêmicos causados pelas transformações no uso do solo ocorridas na região em um intervalo de 30 anos. Os resultados mostraram que as ações antropogênicas correspondem aos principais fatores de alteração na disponibilidade dos serviços locais, com ênfase no abastecimento de água, solos e recursos minerais, influenciando na qualidade de vida das espécies que habitam a região. Reforçamos a visão de que as políticas públicas de gestão e planejamento do território devem considerar a avaliação do ecossistema, pois ela fornece evidências para propor ações de mitigação de impactos e de compensação ambiental, favorecendo o uso sustentável dos recursos pela sociedade.

PALAVRAS-CHAVE: Serviços ecossistêmicos; Geodiversidade; Bacia de Taubaté; Expansão urbana.

ASSESSMENT OF IMPACTS ON ECOSYSTEM SERVICES PROVIDED BY GEODIVERSITY IN HIGHLY URBANISED AREAS: A CASE STUDY OF THE TAUBATÉ BASIN, BRAZIL

Fernanda Coyado Reverte^{1,2}, Maria da Glória Motta Garcia¹, José Brilha², Alan Uchoa Pellejero³

(1) Institute of Geosciences, University of São Paulo, São Paulo, Brazil.

(2) Institute of Earth Sciences, University of Minho, Braga, Portugal.

(3) Institute of Mathematical and Computer Sciences, University of São Paulo. São Paulo Brazil.

E-mails: fernanda.reverte@usp.br; mgmgarcia@usp.br; jbrilha@dct.uminho.pt; alan.pellejero@usp.br.

ABSTRACT: This work presents a method to identify, to evaluate and to quantify the losses of the offer of ecosystem services provided by geodiversity, using as a case study the Taubaté Basin region, a highly urbanized portion of southeastern São Paulo State, Brazil. Our method considers not only the qualitative analysis of the abiotic aspects, but also the historical and cultural context, in which the geodiversity elements are crucial for local economy development. The method is based on: i) Qualitative evaluation and definition of six Essential Geodiversity Variables (EGVs), used as the basis for the identification of 53 ecosystem services distributed into four functions: regulating, supporting, provisioning, and cultural; ii) Definition of land use categories based on two land use maps elaborated in order to compare the transformation occurred in the region between 1986 and 2016; iii) Quantification and evaluation of the impacts on the offer of ecosystem services caused by land use transformations occurred in region in a 30-year gap. The results showed that the anthropogenic actions are the main factors that alter the availability of local services, with emphasis on the supply of water, soils and mineral resources, and its potentially influence in the quality of life of the species that inhabits the region. We reinforce the view that public policies on land management and planning should consider the ecosystem assessment, as it provides evidence to propose actions to mitigate impacts and for environmental compensation, favoring the sustainable use of resources by society.

KEYWORDS: Ecosystem services; Geodiversity; Taubaté Basin; Urban expansion.

1. INTRODUCTION

The concept of ecosystem was coined by Tansley (1935) to identify a set of communities composed by biotic and abiotic elements, which occupy a place and interact with each other and with the environment, to create a stable and balanced system. The dynamics of a self-sufficient ecosystem influences the supply of natural resources that live beings benefit from. However, the growing transformation of the urban environment by society has increasingly demanded the use of natural resources, influencing these dynamics. Anthropogenic activities, such as inappropriate land use, emission of pollutants and deforestation, generate negative impacts to ecosystems, affecting the flow of environment services that are fundamental to sustain life on Earth.

Since the 1960s, when King (1966) and Helliwell (1969) introduced the concept of natural benefits, the scientific community has been increasingly interested in understanding and describing how the ecosystems work and how they influence the well-being of the population (Ehrlich & Mooney, 1983; De Groot et al., 2002; MEA, 2005). In the mid-1990s, this concept also started to have an economic bias, referred to as natural capital (Costanza & Daly, 1992; Gómez-Baggethum et al, 2010; Bennett et al, 2014), and which corresponds to the stock of natural resources that generate a flow of tangible and intangible benefits, directly or indirectly useful to humans. These benefits are known as ecosystem services (Costanza et al., 1997).

Many authors have suggested different classifications for the ecosystem services (Costanza et al., 1997; De Groot et al., 2002; Daily & Farley, 2004; Boyd & Banzhaf, 2007; Brown et al., 2007; Fisher et al., 2009; Teeb, 2010; Farley, 2012). However, only after the Millennium Ecosystem Assessment (MEA) — considered the first major international effort to explore the relationship between human welfare and services — did these concepts become more prominent, especially in the scientific and political spheres (Pandeya et al., 2016). The definition proposed by the MEA in 2005 is the most-widely used and groups the services into four functions: provisioning, regulating, supporting and cultural.

Although intensely discussed in recent decades, the existing classifications for ecosystem services often neglect the relevance of the geodiversity elements for the service flows. Geodiversity comprises all abiotic resources that make up nature (e.g.

minerals, rocks, soils, rivers and landforms, as well as geological phenomena such as weathering and vulcanism) and whose products are fundamental for the generation and maintenance of natural resources (Gray, 2013). It is worth noting its importance in the context of knowledge, since it allows us to understand the history of Earth, the many geological events that happened throughout the evolution of the planet, and which are recorded in rocks and sediments.

Due to the importance of geodiversity elements in the provision of natural resources, some authors have included the geological aspects in the classification of ecosystem services (Gray, 2011, 2013, 2018a; Gordon et al, 2012.). By emphasizing the intrinsic value of geodiversity, Gray (2013) adapted the definition proposed by MEA (2005) and included a fifth category called “Knowledge Services”, which refers to the use of geodiversity elements for research, teaching and spreading geosciences. The author has maintained this proposition in recent papers (Gray, 2018b, 2019), in which these ecosystem services are referred as Geosystem Services.

Brilha et al. (2018) brought a different proposal of classification to the benefits provided by geodiversity, focusing on the sustainable use of natural resources within an ecosystem approach described in consolidated proposals (MEA, 2005; Teeb, 2010; Haines–Young & Potschin, 2018). For each service — regulating, supporting, provisioning and cultural — the authors defined a set of goods and processes with 17 parameters. The “Knowledge Services” (Gray, 2013) is considered as a sub–item in the “Cultural Services” group. All these parameters attempt to illustrate the relationship between nature, geodiversity and society, and emphasize their importance in the provision of resources as a determining factor in the quality of life in the region.

In this context, Schrodt et al (2019) proposed a list of variables to describe the resources and processes that occur on the Earth's surface, called Essential Geodiversity Variables (EGVs), classified in geology, geomorphology, soils and hydrology. According to the authors, these categories can underpin public policy proposals for geoconservation, balancing economic, social and environmental aspects in promoting sustainable development.

The Taubaté Basin is located in the southeastern region of São Paulo State, between the Mar and Mantiqueira mountains, which are true strongholds of Brazilian biodiversity. The region has a dense hydrographic network, represented by the

Paraíba do Sul river and its tributaries, which supply important industrial centers and a large part of the local population. However, this geodiversity has been threatened by the effects of weathering and especially by anthropogenic activities, interfering with the flow of services.

Given the above, this study aims to identify, evaluate and quantify the ecosystem services provided by geodiversity in the Taubaté Basin region, so as to establish the importance of natural goods in the socioeconomic and environmental development of the region. Thus, it is intended to foster the interest of the government in the management of these resources, allowing the creation of necessary measures to mitigate human impacts, which strongly affect geodiversity elements and interfere in the provision of local ecosystem services.

2. STUDY AREA: LOCATION AND GEOLOGICAL CONTEXT

Located in southeastern Brazil, in the southeastern portion of the state of São Paulo, Taubaté Basin comprises eleven municipalities in the Paraíba Valley and covers an area of just over 2 300 km² (Fig. 1). The region has lately been under transformation due to the high density of population and to the urbanization, which requires infrastructure improvements to meet this growing demand. In addition, the area is crossed by major highways that link two of the Brazil's most important commercial and industrial hubs: São Paulo and Rio de Janeiro.

Geologically, the Taubaté Basin is part of a set of basins that form the Continental Rift of Southeastern Brazil (CRSB), a regional Cenozoic tectonic feature formed by a narrow and depressed 900 km–long strip, (Riccomini, 1989). Taubaté basin is the largest tectonic depression of the rift, with about 850 m–thick, 170 km–long and 25 km–wide (Riccomini, 1989; Fernandes & Chang, 2003; Vidal *et al.*, 2004).

The geological events related to the evolution of CRSB are associated with the final stage of fragmentation of the supercontinent Gondwana, which were responsible for the formation of the South Atlantic Ocean. These events have generated rocks that represent part of the geodiversity of the Paraíba Valley, whose geological wealth is gradually vanishing due to the extreme vulnerability and fragility of its evidences.

Figure 1: Location of the study area showing the Continental Rift of Southeastern Brazil.

3. MATERIALS AND METHODS

This work was carried out in five stages:

- (i) **References research:** to identify and describe the abiotic resources used for the qualitative assessment of geodiversity and ecosystem services.
- (ii) **Identification of the Essential Geodiversity Variables (EGVs) – based in Schrodt et al. (2019):** six EGVs were identified in the study area: i) rocks and structures; ii) mineral resources; iii) fossils; iv) landforms; v) water resources; and vi) soils.

- (iii) **Identification of ecosystem services provided by geodiversity elements:** these services were characterized based on the qualitative evaluation of the EGVs defined in the previous step, and also on Brilha et al. (2018).
- (iv) **Land use mapping:** based on Google Earth[®] images land–use maps were produced (1986 and 2016, both December). Through the interpretation of both maps and using the Quantum Gis[®] software package, six polygons were delimited referring to the identified areas, called "Land Use Categories": native vegetation (heterogeneous vegetation), mineral extraction (visible areas and abandoned digs), urban occupation (considering all urban and rural areas), forestry (rectilinear and uniform planting pattern) and farming (areas visibly intended for agriculture and animal husbandry). These data allowed us to assess the increase of impacts caused by urban development due anthropogenic activities and were the basis for the quantification of services.
- (v) **Quantification of ecosystem services provided by geodiversity elements:** a three–stage method for the services quantification is proposed (adapted from Longo and Rodrigues, 2017):

– Firstly, definition of *Significance* (σ) of the natural environment change caused by the "Land Use Categories" and based on the parameters described in Table 1. For each parameter — Coverage, Magnitude and Reversal Factor — is given a value ranging from one to three, except coverage which varies from one to two, Local and Regional, respectively, due the size of the area of study.

Table 1: Criteria used to classify the Significance (σ) of alteration of natural environment in the Taubaté Basin.

Parameter		Classification		
Name	Description	Class	Value	Description
Coverage	Size of the impacted area	Local	1	Local and limited changes
		Regional	2	Widespread changes
Magnitude	Intensity of changes	Low	1	Minor changes
		Medium	2	Significant changes
		High	3	Very significant changes
Reversal factor	Capacity of restoration	Fully reversible	1	The initial conditions can be fully restored
		Partially reversible	2	The changes can be ceased avoiding further damages
		Irreversible	3	Not possible to cease changes or to restore initial conditions

The *Significance* (σ) is the sum of the values given to each parameter, as shown below (Fig. 2):

<i>Significance</i> (σ)					
Low		Medium		High	
3	4	5	6	7	8

Figure 2: *Significance rating.*

From the statistical point of view, the division of the *Significance* (σ) in three parts (low, medium or high) permits to identify how representative these parameters are in the quantification context. The choice of whole positive values for the classification results from the fact that the data are *ordinal qualitative* (or *categories*) (James et al, 2013), consistent with the respective descriptions made in the Table 1. In order to avoid biased results we did not consider any of the parameters equal to zero since its calculation depends of some product operations.

The numerical data for the quantification of ecosystem services are arranged in tables, containing inline and column information to be associated. For this reason, the following mathematical description will use matrix notation. Therefore, we will consider the matrix $A_{m \times n}$ such that $A = (a_{i,j})$, and:

- (i) $A_{m \times n}$: the rectangular matrix consisting of “m” rows and “n” columns; and
- (ii) $a_{i,j}$: the element of the array A that occupies the i – th row and j – th column.

Associating the data of Table 1 to the significance rating it was possible to create the matrix A (corresponding to Table 6, described in the topic "results" below) to obtain the significance value.

The quantification in Table 6 allowed us to calculate the *Significance* (σ), given by: $\sigma = \sum_{j=1}^3 a_{i,j}$, with $1 \leq i \leq 5$. In the case study, the maximum value for the *Significance* (σ) occurs when $i = 3$; that is, in the "Urban Occupation" category. Thus, $\max \{\sigma\} = 8$.

– Secondly, we quantified the relationship between the “Land Use Categories” and the ecosystem services described in Brilha et al. (2018) (Table 2), which allowed the construction of matrix B (corresponding to Table 7, described in the topic "results" below).

Table 2: Ecosystem Services (Brilha et al., 2018).

ECOSYSTEM SERVICES	DIVISION
REGULATING Conditions that allow the existence of life and modern society	R1. Atmosphere
	R2. Geosphere
	R3. Hydrosphere
SUPPORTING Of life conditions and social development	S1. Soil
	S2. Water
	S3. Surface rocks and landforms
	S4. Underground rocks and landforms
PROVISIONING Of renewable and non-renewable resources which are fundamental to life and society	P1. Nutrients
	P2. Food and drink
	P3. Water
	P4. Construction materials
	P5. Industrial and metallic minerals
	P6. Energy resources
	P7. Ornamental products
CULTURAL Contribution of the physical environment to the development of cultural activities	C1. Wellness and health
	C2. Recreation
	C3. Human history
	C4. Knowledge

In matrix B, formed by numerical data from Table 7, it is observed that the maximum value for an element $b_{i,j}$ of matrix B, with $1 \leq i \leq 18$ and $1 \leq j \leq 5$, is such that $\max\{b_{i,j}\} = 3$, which is the occurrence of a direct relationship between the "Land Use Categories" and the ecosystem services.

– Finally, based on matrices A and B (Tables 6 and 7, respectively), matrix C was obtained (Table 8), whose elements $c_{i,j}$ of C, with $1 \leq i \leq 18$ and $1 \leq j \leq 5$, are such that: $c_{i,j} = b_{i,j} \times \sigma = b_{i,j} \times \sum_{r=1}^3 a_{j,r}$. The set of data obtained from the matrix C allowed us to calculate the *Relative Significance* (σ_{Rel}) per ecosystem service, which enabled the quantification of the loss of ecosystem services.

The *Relative Significance of the ecosystem services group* (σ_{Group}) was calculated using the simple arithmetic mean of the values of *Relative Significance* (σ_{Rel}) of each service.

4. RESULTS

4.1 *Essential Geodiversity Variables*

For the Taubaté Basin, six EVGs were defined as the basis for the identification of ecosystem services, showing the importance of abiotic resources in local socio-environmental development. These EVGs represent the physical aspects identified in the qualitative assessment of the basin area. The consolidated results of this description are presented in Table 3.

Table 3: Description of the six EGVs used in the classification of local geodiversity.

EGVs		BRIEF DESCRIPTION	REFERENCES
ROCKS AND STRUCTURES		<ul style="list-style-type: none"> – Faults and structures related with different stages of the tectonic evolution of the basin; – Granite and gneiss rocks of the Precambrian basement; and – Sedimentary rocks different depositional contexts: Taubaté Group (Resende, Tremembé and São Paulo Formations), and Pindamonhangaba and Itaquaquecetuba Formations. 	<ul style="list-style-type: none"> – Riccomini (1989); – Fernandes & Chang (2003); – Vidal et al. (2004).
MINERAL RESOURCES		<ul style="list-style-type: none"> – Industrial minerals: sand and clay minerals; – Energy minerals (peat); – Quartzite and granite rocks (mined for gravel, stonework, cladding or ornamental purposes). 	<ul style="list-style-type: none"> – Cabral Junior et al. (2001); – DNPM (2016).
FOSSILS		<ul style="list-style-type: none"> – High diversity, quantity and quality of the fossil record, namely angiosperm leaves and trunks, sponge spicules, crustaceans, worm tubes, gastropods, fish, birds, reptiles and mammals. 	<ul style="list-style-type: none"> – Mezzalira (1989); – Garcia & Saad (1996) – Bernardes-de-Oliveira et al. (2002).
LANDFORMS		<ul style="list-style-type: none"> – The basin is part of the Paulista Atlantic Plateau, which is included in a mountain range that is the most prominent orogenic feature of the South American Atlantic coast; and – The dissected slopes of the Atlantic Plateau, where there are 600 to 700m–high hills with convex tops, floodplains, and the Paraíba do Sul river fluvial plain. 	<ul style="list-style-type: none"> – Almeida (1964); – Almeida & Carneiro (1998); – Ab'Saber (2003);
WATER RESOURCES	Surface	<ul style="list-style-type: none"> – The Paraíba do Sul river Basin represents one of the most important basins in the country and covers an area of approximately 55 thousand km², enclosing portions of the states of São Paulo, Rio de Janeiro and Minas Gerais. It is also fully inserted in the Atlantic Forest biome; – The Paraíba do Sul river's source is located 1,800 meters high in Serra da Bocaina, in São Paulo, and its mouth is in the municipality of São João da Barra, in Rio de Janeiro, covering a little over 1,300 km of length. – The region is cut by many rivers that flow from Mar and Mantiqueira Mountains into the Paraíba do Sul river. 	<ul style="list-style-type: none"> – ANA (2002); – Coltrinari (2003); – Coelho (2012); – CEIVAP (2016).
	Groundwater	<ul style="list-style-type: none"> – The region has two aquifer systems: Cristalino and Taubaté. 	<ul style="list-style-type: none"> – ANA (2002); – Vidal & Chang (2002); – Iritani & Ezaki (2009).
SOILS		<ul style="list-style-type: none"> – The soils of the region fall into four major categories: Argisols, Cambisols, Gleysols and Latosols. 	<ul style="list-style-type: none"> – Oliveira et al. (1999); – EMBRAPA (2013).

4.2 Ecosystem services provided by geodiversity

4.2.1 Regulating services

These services refer to the benefits obtained through ecosystem processes, such as water cycle regulation, water purification and erosion control, and their influence on the natural management of atmospheric and terrestrial processes as much as the quantity and quality of natural resources.

Among all atmospheric processes, the hydrological cycle is a major factor for life maintenance. In the study region, it is associated to the Paraíba river and its tributaries and is responsible for supporting the refill flow provided by groundwater, providing water to the bodies that converge to the river basin (Fig. 3A). Other important regulating functions can be associated with the Paraíba do Sul wetlands. Both riparian zones, such as the forest systems located on the banks of watercourses, as the existing river islands in some stretches of the river (Fig. 3B), provide a number of ecosystem services: maintenance of the microclimate and the quality of water, and reduction in erosion rates, sedimentation and runoff (Castro et al., 2013; Hepp & Gonçalves—Jr, 2015).

In relation to terrestrial processes, the rock cycle controls the content of carbon in the atmosphere, released through weathering processes that influence climate throughout the geological time (Fig. 3C). Soils also play an important regulating role, since they have the greatest carbon stock in terrestrial ecosystems, thus helping balance the concentration of the gas in the atmosphere (Bruce et al., 1999).

Figure 3: Regulating services provided by the Taubaté Basin geodiversity. A) Paraíba do Sul river, which is responsible for many regulating ecosystem services; B) Fluvial Islands (important in flood control) in a stretch of Paraíba do Sul, indicated by the yellow arrow; C) An example of chemical weathering, relevant in the cycle of carbon, in a local geosite (Reverte et al., 2019).

4.2.2 *Supporting Services*

Geodiversity elements are a form of support for the development of activities of live beings, be it the use of these resources as a habitat, such as caves, or as a substrate for construction of developments. They also comprise places that are used for storage — such as landfills or natural water or oil reservoirs — and burials (human or animal), in addition to the development of soil profiles as support for biodiversity and other economic activities related to agriculture (Gray, 2013; Brilha et al., 2018).

Soils have always played key roles in the economy of the region, serving as the basis for the development of numerous farming activities that have modified ecosystems aiming at optimizing the production to meet the demands of the national and international market.

In the early nineteenth century, it was in this place that coffee became the main Brazilian export product, reaching its peak in 1850, when 37% of farming production and 80% of all coffee in the state of São Paulo came from the Paraíba Valley (Devidé, 2015) (Fig. 4A). The culture of coffee, initially produced by slave labor, brought great economic prosperity and political influence to local coffee farmers (Sobrinho, 1978).

The area is currently important due to its flood rice production. This technique requires intense availability of water resources, and its development directly depends on the Paraíba do Sul river (Fig. 4B). It should be noted that agriculture also corresponds to a provision service, in the case of food, as we will see below.

Regarding the use of geodiversity for storage, there are six landfills in the region that function as large complexes for processing industrial, commercial, hospital and domestic waste (Fig. 4C). Such facilities contribute to reducing the potential risk of soil and water contamination derived from anthropogenic activities.

There are also archaeological remains, such as burial coffins used by the indigenous people who inhabited the area in the pre-colonial period, as well as other lithic artifacts, dated from the 12th century (Caldarelli, 2003) (Fig. 4D). Although archaeological sites are part of cultural services, in this case we are referring to the use of the subsoil for burial of these peoples, which is a support service.

Figure 4: Supporting services provided by the geodiversity of the Taubaté Basin. A) Slaves working with coffee in a farm in the city of Lorena. Photo: Moreira Salles Institute collection (1882); B) Rice plantation in Paraíba do Sul floodplains. Photo: Christian Kather; C) URBAM landfill in São José dos Campos; D) Funeral urn at an archaeological site of Caçapava, containing bone fragments and lithic materials from the 12th century. Left jaw in the detail. Source: Caldarelli (2003).

4.2.3 Provisioning Services

These are the services provided by ecosystems for the benefit of species that inhabits the region, especially the human being. They are often associated with monetary value, as it occurs with mineral resources, which helps to be recognized by the society.

Among the provisioning services offered by local geodiversity elements, the Taubaté Aquifer and the Paraíba do Sul river Basin play crucial roles as water sources, in the development of the economy and of the quality of life of the population that lives in the cities within the basin area and also in its surroundings (Fig. 5A).

The existence of this reservoir is directly related to sediments of Resende and Tremembé Formation. This aquifer is recharged by direct rainfall over the basin, and natural discharges into the Paraíba do Sul river. The aquifer, which covers an area of approximately 2 340 km², has higher productivity in wells located in sandy sediments, whose flow rates may exceed 120 m³/ h (Durigan & Simões, 2015). On the other hand, the Paraíba do Sul river Basin supplies water to more than two million

inhabitants in the state of São Paulo alone.

Another significant provisioning service refers to the supply of mineral resources, especially sand and clay. According to the National Department of Mineral Production (DNPM, 2016), 60% of the total mining concessions in the entire region correspond to sand exploitation, most of which targets the construction market (Fig. 5B). Clay deposits are associated with the Tremembé Formation shales (Fig. 5C), consisting of clay minerals which are marketed under the name of “bentonite” after undergoing chemical processes. Bentonite is used for soil sealing, clumping of smelting sand, oil processing in the production of biodiesel, fertilizers, pesticides, among other applications.

Figure 5: Provisioning services provided by the geodiversity in the Taubaté Basin. A) Santa Branca Hydroelectric Power Plant. The 500m-long dam was built in the Paraíba do Sul river in the region of São José dos Campos. Source: opetroleo.com.br; B) Active sand mining pit in the municipality of Tremembé. Image: Helio Diniz; C) Shale mining by Extrativa Santa Fe, in Tremembé. Source: www.esantafe.com.br; D) Peat sampling work in São José dos Campos region. Image: Cícero Oliveira.

Although clay and sand correspond to the main mineral resources provided by the geodiversity elements in the region (Fig. 6), other materials are also extracted for economic purposes (Table 4).

Table 4: Main mineral goods present in the Taubaté Basin, by municipality (DNPM, 2016).

RAW MATERIALS	LOCATION	USE
Sand	Caçapava, Guararema, Lorena, Jacareí and Tremembé	Aggregate in construction industry
Common clays	São José dos Campos, Jacareí, Taubaté, Pindamonhangaba and Tremembé	Agriculture, pulp and paper industry
Refractory and plastic clays	Pindamonhangaba, Caçapava, Taubaté and Jacareí	Chemical Industry, Foundry, Red Ceramics
Limestone and dolomite	Taubaté	Cement Production, Construction industry
Oil shales	Tremembé	Varied industries and energy purposes
Granite, gneiss and related	São José dos Campos	Cladding, ornamentation, gravel
Lignite	Caçapava	Varied industries and energy purposes
Peat (Fig. 5D)	São José dos Campos, Caçapava and Jacareí	Agricultural fertilizer and energy purposes

Figure 6: Location of the areas of extraction of the main mineral resources of the basin (DNPM, 2016) and of the 338 capture wells in the Taubaté Aquifer (CPRM, 2019).

4.2.4 *Cultural Services*

They refer to the intangible benefits obtained from ecosystems and that may favor the economic and social development of a region, contributing to the well-being of society through spiritual and cultural enrichment, reflection on natural processes, leisure, ecotourism and recreation (Gray, 2013; Brilha et al., 2018). It also covers scientific knowledge, that is, the use of geodiversity elements to promote the teaching and dissemination of geosciences (Reverte et al., 2019).

The variety of geodiversity elements in the basin makes it possible to use them in many ways. In tourism, for example, numerous lookouts supported by rocks of the Proterozoic basement are frequently visited by people who seek adventure sports, leisure and contemplation of nature. Marins's Peak and the geosite Itapeva's Peak (Garcia et al., 2018; Reverte et al., 2019) are good examples of such places. Geodiversity also provides leisure and recreation through nature trails, waterfalls where people swim and practice radical sports, like rappelling and climbing. Additionally, the tributaries of the Paraíba do Sul river are commonly visited for the practice of kitesurfing (Fig 7A).

Geodiversity elements are also connected with cultural aspects through historical reports, folk tales and religious issues. Among the historical accounts, in addition to the coffee cycle records, artifacts in ceramic, glass and lithic material — chipped stones, spears tips and hand axes — have been found. They are related to the indigenous people who inhabited the region in the sixteenth century (Lopes, 2014). As an example of folk history, the myth of the “Sleeping Giant” tells the legend of an indigenous that saved his people from the explorers in the 16th century and, after the heroic act, lay between the trees in an eternal sleep, turning into a large rock (Fig. 7B). Regarding religious aspects, the municipality of Aparecida is known as the “Mariana Capital of Faith” and is annually visited by more than eleven million people, hence being considered the largest center of religious pilgrimage in Latin America. As a source of artistic inspiration, the French painter Jean Baptiste Debret portrayed the landscape of the Paraíba Valley when he was in the region in 1827, illustrating numerous watercolors that were published in 1843 in his work entitled “Voyage pittoresque et historique au Bresil” (Fig. 7C).

The region also encompasses a relevant geological heritage represented by fossils, which can be used for teaching geosciences, exemplifying the way of life of

currently extinct species. In Brazil, fossils are used only for research and exhibition in museums, since their commercialization is a crime. In this sense, it is important highlighting the Natural Museum of History of Taubaté (NMHT), which has an extensive collection of rocks, minerals, fossils and replicas of animals that inhabited the region - *ex situ* geological heritage -, including a fossil skeleton of *Paraphysornis brasiliensis*, a 2.40 m-tall carnivorous bird that inhabited the Paraíba Valley 23 Ma ago, is another example of cultural services. His nearly complete skeleton was found in the city of Tremembé in the decade of 1970 and can be seen in the permanent exhibition of the NMHT (Fig. 7D).

Regarding the dissemination of geosciences, the Taubaté Basin is considered an open-air school, with potential for the development of research in many fields of knowledge, such as the understanding of geological and geomorphological processes that are responsible for the current landscape. Its strategic location, close to renowned educational institutions in the country — such as the University of São Paulo (USP) — makes it a choice for field work, as well as for activities aimed at teaching, research and extension (Fig. 7E). In the field of geotourism, in addition to visiting the NMHT, only two geosites with geomorphological interests have infrastructure and security and can be explored for tourist visits (Reverte et al., 2019).

Figure 7: Cultural services provided by the geodiversity in the Taubaté Basin: A) Use of geodiversity for leisure in the Buffalo Waterfall. Image: Ligia Antoniazzi; B) Reference to the legend of the Sleeping Giant, indicated by the yellow arrow. Image: Celso Galvão; C) Jean – Baptiste Debret's watercolor illustrating the city of Guaratinguetá, with the Mantiqueira Mountains in the background; D) Replica of *Paraphysornis brasiliensis* exhibited at the Museum of Natural History of Taubaté; E) Knowledge Service: Taubaté Basin Geosite used for teaching purposes.

The Table 5 summarizes the 53 ecosystem services provided by the geodiversity in the Taubaté Basin, distributed among the regulating, supporting, provisioning and cultural categories.

Table 5: Summary of the main ecosystem services provided by the geodiversity in the Taubaté Basin region.

EGVs	ECOSYSTEM SERVICES			
	REGULATION	SUPPORTING	PROVISIONING	CULTURAL
ROCKS AND STRUCTURES	<ul style="list-style-type: none"> Chemical weathering influences the carbon cycle control over time; Flood control, with water table feeding; Porous rocks act as a natural filter; Quality of water. 	<ul style="list-style-type: none"> Substrate for human construction. 	<ul style="list-style-type: none"> Natural freshwater reservoirs and filters; Mineral resources. 	<ul style="list-style-type: none"> Lookouts; Climbing; Adventure sports; Lithic materials; Knowledge (Earth History; Tectonics; Stratigraphy; Sedimentation).
MINERAL RESOURCES	<ul style="list-style-type: none"> Aquifer recharge; Carbon sequestration from the atmosphere (peat). 	<ul style="list-style-type: none"> Absent. 	<ul style="list-style-type: none"> Materials for construction; Ornamental stones; Fuel. 	<ul style="list-style-type: none"> History of mining; Archaeological remains; Knowledge (monitoring and environmental quality; mineral prospecting).
FOSSILS	<ul style="list-style-type: none"> Absent. 	<ul style="list-style-type: none"> Absent. 	<ul style="list-style-type: none"> Fossils. 	<ul style="list-style-type: none"> Museum of Natural History of Taubaté; Knowledge (Evolution of species; climate change; history of the Earth).
FORMS OF RELIEF	<ul style="list-style-type: none"> Erosive processes that shape and modify the landscape by interfering with climate over time. 	<ul style="list-style-type: none"> Habitat and maintenance of biodiversity; Erosive processes that act in soil formation. 	<ul style="list-style-type: none"> Absent. 	<ul style="list-style-type: none"> Artistic inspiration; Leisure and tourism; Aesthetic and folkloric values; Knowledge (evolution of relief; weathering agents).
WATER RESOURCES	<ul style="list-style-type: none"> Participation in the hydrological cycle and maintenance of the groundwater recharge flow. 	<ul style="list-style-type: none"> Habitat and maintenance of biodiversity; Soil formation; Transport. 	<ul style="list-style-type: none"> Fresh water supply; Food production; Power generation; Transport. 	<ul style="list-style-type: none"> Leisure and tourism; Aesthetic, intellectual and spiritual values; Knowledge (hydrological dynamics).
SOILS	<ul style="list-style-type: none"> Climate regulation through carbon sequestration; Erosion control. 	<ul style="list-style-type: none"> Nutrient cycling; Maintenance of biodiversity; Soil formation. 	<ul style="list-style-type: none"> Water reservoir; Energetic (peat); Agricultural production; Pharmaceuticals. 	<ul style="list-style-type: none"> Education; Historical context; Knowledge (origin and morphology of soils; geotechnics; management for use and occupation).

4.3 *Land use assessment*

For a proper management of natural resources in a certain area, it is important to have a good knowledge of its physical characteristics, land use patterns, and statistical analysis of the local population. Hence, making maps is an effective way to assess eventual environmental impacts. Moreover, maps can help in the planning of the territory and in the definition of priority areas for conservation (Pereira et al., 2013). In Santos et al. (2017), geodiversity and urban development maps were used to assess the impacts of urbanization in a tourist zone of the state of Rio de Janeiro, Brazil.

The production of land use maps of the Taubaté Basin, allowed us to quantify urban growth and have provided a more accurate assessment of the impacts caused to natural resources, between the years of 1986 and 2016 (Fig. 8A and B).

Figure 8: Land use map in the Taubaté Basin. A) Year of 1986; B) Year of 2016.

When maps are compared, it is possible to observe a significant increase in urban occupation and mineral extraction along the Paraíba do Sul river. Other parameters considered in the analysis also varied, as shown in Figure 9.

Figure 9: Variation in area of land use in the Taubaté Basin between 1986 and 2016.

In this figure we can observe decreases in native vegetation and agricultural areas, possibly due to urban expansion, whose anthropogenic activities directly affect the offer of regulation, supporting and provisioning services. In this sense, the agricultural activity is exercised in the region, the farming activity is mainly carried out by small farmers, who combine agriculture and livestock, which are the basis for many agricultural business supply chains. Rice production, which occurs mainly on the banks of the Paraíba do Sul river, and cattle ranching focused on milk production, currently stand out (Fagundes, 2019).

About the areas of mineral extraction, the chart shows even more significant growth. In 30 years, there was an increase of almost 600% in mining areas, especially located along the Paraíba do Sul riverbanks. This fact justifies the increase of forestry in this period, since a considerable number of mining companies usually plant eucalyptus as a form of environmental compensation. In this context, although eucalyptus plantations contribute to atmospheric regulation services, mineral extraction in a predatory manner may lead to the depletion of natural resources, damaging the elements of geodiversity and its supply as a supply service.

Regarding urban occupation, the region encompasses eleven major cities that are economically relevant due to jobs, education and quality of life they offer, like

Guaratinguetá, Lorena and Taubaté. This influences the population's increase, whose growth reached almost 70% between 1986 and 2016 and has occurred in an unplanned manner, damaging the supply of environmental services made available by geodiversity. Reverte et al. (2019) describe how the damage resulting from anthropogenic activities has affected both the geological heritage and the natural resources of the region, proposing mitigation measures for the impacts identified.

4.4 Quantification of Ecosystem Services

As described in methods, the Table 6 results from the association between the data in Table 1 and the values of the significance rating (Fig. 2), indicating the *Significance* (σ) values for each land use category, illustrated in the last column of matrix A, below:

Table 6: Matrix A of significance classification. The signs "+" and "-" correspond to increase and loss, respectively.

LAND USE CATEGORIES	COVERAGE	MAGNITUDE	REVERSAL FACTOR	SIGNIFICANCE (σ)
	Local (1) Regional (2)	Small (1) Medium (2) Large (3)	Fully Reversible (1) Partially Reversible (2) Irreversible (3)	Low (3–4) Medium (5–6) High (7–8)
(–) Native vegetation	1	2	2	5
(+) Mineral Extraction	2	3	2	7
(+) Urban occupation	2	3	3	8
(+) Forestry	2	3	1	6
(–) Farming	2	1	1	4

The values 1, 2 and 3 were determined in according to an evaluation of each parameter considering the area in study. Hence, they were filled in by the authors based on prior knowledge of the field of study. For example, for the category "Mineral Extraction", the authors considered the "Coverage" as "Regional" (2), since the mining areas are distributed throughout the basin; the "Magnitude" of impact caused by mining in the region was considered to be "Large" (3), since it occurs in a poorly planned manner and has caused environmental damage; and the mining activity can be "Partially reversible" (2), since these activities can be planned so as not to further harm the environment. The sum $2 + 3 + 2 = 7$ represents the *Significance* (σ) value for the category in question.

Table 7: Matrix B of the connection between categories and ecosystem services. 1 = not a relevant relationship; 2 = indirect relationship; 3 = direct relationship. The signs “+” and “-” correspond to increase and loss, respectively

ECOSYSTEM SERVICES		LAND USE CATEGORIES				
		(-) Native Vegetation	(+) Mineral Extraction	(+) Urban Occupation	(+) Forestry	(-) Farming
REGULATION	R1. Atmosphere	3	2	3	3	2
	R2. Geosphere	1	3	3	1	2
	R3. Hydrosphere	3	2	3	3	2
SUPPORTING	S1. Soil	3	3	3	3	3
	S2. Water	3	2	3	3	3
	S3. Surface rocks and landforms	2	3	2	2	3
	S4. Underground rocks and landforms	1	3	1	1	1
PROVISIONING	P1. Nutrients	3	2	1	3	3
	P2. Food and drink	3	2	2	2	3
	P3. Water	2	2	1	2	1
	P4. Construction materials	3	3	1	2	2
	P5. Industrial and metallic minerals	1	1	1	1	1
	P6. Energy resources	2	3	1	2	2
	P7. Ornamental products	1	3	1	1	1
CULTURAL	C1. Wellness and health	3	2	2	3	3
	C2. Recreation	2	1	2	2	1
	C3. Human history	1	2	2	1	2
	C4. Knowledge	2	3	2	2	2

The Table 7 represents the matrix B, created from the correlation between divisions of ecosystem services described in Brilha et al. (2018) — totaling 18 services distributed in four ecosystem functions — and the “Land Use Categories”. Three values were established: 1 — when the ecosystem service has no relevant relationship with the assessed category; 2 — when there is an indirect relationship; and 3 — when there is a direct relationship. The filling of matrix B is also subjective and should be done based on prior knowledge of the area assessed.

From the values obtained in matrices A and B it was possible to calculate the *Relative Significance* (σ_{Rel}) values by ecosystem service and the *Significance of the group* (σ_{Group}) of ecosystem services. The results are expressed in matrix C (Table 8).

As an example of the application of the method, consider the set of ecosystem services. The *sum* S relating to each service s_e is: $S(s_e) = \sum_{j=1}^5 c_{i,j}$, $1 \leq i \leq 18$. For example, in order to calculate the *sum* S relating to the ecosystem service s2 (Water) consider $i = 5$.

Thus, $S(s2) = \sum_{j=1}^5 c_{5,j} = c_{5,1} + c_{5,2} + c_{5,3} + c_{5,4} + c_{5,5} = 15 + 14 + 24 + 18 + 12 = 83$.

The *Relative Significance* (σ_{REL}) by ecosystem service is

$$\sigma_{REL s_e} = \frac{S(s_e)}{5 \max\{\sigma\} \max\{b_{ij}\}} = \sigma_{REL s_e} = \frac{S(s_e)}{5 \max\{\sigma\} \max\{b_{ij}\}} = \frac{S(s_e)}{120}, \text{ since } \max\{\sigma\} = 8 \text{ and } \max\{b_{ij}\} = 3. \text{ For example, if } S = s_2, \text{ then: } \sigma_{REL s_2} = \frac{S(s_2)}{120} = \frac{83}{120} = 69,2.$$

The diagram on figure 10 synthetizes the steps used in the achievement of the values in the proposed method.

Figure 10: Schematic flowchart illustrating the steps used for quantification. The land use category "Urban Occupation" and the service "S2 - Water" (Supporting function) are used as references.

Table 8: Matrix C of Relative Significance of the land use categories linked to the provision of ecosystem services provided by the geodiversity in the region.

ECOSYSTEM SERVICES		LAND USE CATEGORIES					SUM (S)	Relative Significance per ecosystem service (σ _{REL}) (%)	Relative Significance per ecosystem services group (σ _{Group}) (%)
		Classification of the Significance (σ) of the natural environment change by elements associated to land use (Table 6)							
		(-) Native Vegetation	(+) Mineral Extraction	(+) Urban Occupation	(+) Forestry	(-) Farming			
		5	7	8	6	4			
REGULATION	R1. Atmosphere	15	14	24	18	8	79	65,8	61,7
	R2. Geosphere	5	21	24	6	8	64	53,3	
	R3. Hydrosphere	15	14	24	18	8	79	65,8	
SUPPORTING	S1. Soil	15	21	24	18	12	90	75,0	60,0
	S2. Water	15	14	24	18	12	83	69,2	
	S3. Surface rocks and landforms	10	21	16	12	12	71	59,2	
	S4. Underground rocks and landforms	5	21	8	6	4	44	36,7	
PROVISIONING	P1. Nutrients	15	14	8	18	12	67	55,8	45,4
	P2. Food and drink	15	14	16	12	12	69	57,5	
	P3. Water	10	14	8	12	4	48	40,0	
	P4. Construction materials	15	21	8	12	8	64	53,3	
	P5. Industrial and metallic minerals	5	7	8	6	4	30	25,0	
	P6. Energy resources	10	21	8	12	8	59	49,2	
	P7. Ornamental products	5	21	8	6	4	44	36,7	
CULTURAL	C1. Wellness and health	15	14	16	18	12	75	62,5	50.0
	C2. Recreation	10	7	16	12	4	49	40,8	
	C3. Human history	5	14	16	6	8	49	40,8	
	C4. Knowledge	10	21	16	12	8	67	55,8	

5. DISCUSSION

5.1 *The importance of the definition of EGVs*

The qualitative survey of the geodiversity of the Taubaté Basin region allowed the identification of local ecosystem services, illustrating their importance as a substrate for both the development of economic activities and the subsistence of the living beings that inhabit the area. These services were presented according to their interdependence with the six EGVs defined for the area — rocks and structures, mineral resources, fossils, landforms, water resources and soils —, which represent the elements of local geodiversity, and that should be considered in environmental conservation planning.

From a socioeconomic and environmental perspective, the potential use and fragility of natural resources must be considered when it comes to urban planning. For this, it is crucial to know the geodiversity of a given location to promote a correct land use without interfering with the availability of ecosystem services to the species that inhabit the place. This can be carried out by means of inventories of soils, relief, rocks and minerals, climate, flora and fauna, which practical application is to evaluate the potential use of these resources as life support, considering the fragility of nature, so as not to compromise the intrinsic functionality between physical and biotic components (Ross, 1993).

In this context, some research has been recently done in Brazil considering the ecosystem services of geodiversity as a way to promote more quality of life for the population through the sustainable use of natural resources (Silva, 2018; Garcia et al., 2019). However, although these studies indicate the potential use of geodiversity elements by the population, it is necessary to advance in both qualitative and quantitative analyses using well-defined variables in order to propose appropriate management mechanisms adapted to each context.

The EGVs correspond to the variables that describe the resources and processes that occur on the Earth's surface, such as soils and geomorphology (Schrodt et al., 2019). Therefore, the application of this concept on ecosystem services investigations can favor a proper categorization of abiotic resources and direct systematic evaluations of an specific area. In our study, the definition of EGVs as bases for the identification of ecosystem services in the Taubaté Basin region was

crucial to detect the potential use of geodiversity elements, whether direct or indirect, as well as to recognize potential threats, creating the scenario for the establishment of concrete proposals on public policies for geoconservation that can contribute to local sustainable development.

5.2 *Impacts of anthropogenic activity*

The current society has required the use of natural resources in such a scale that it undermines its full renovation. Thus, many environmental problems are caused by predatory practice, which only aim at the exploitation of natural goods and neglect the consequences of such activities. Examples include increased levels of deforestation, contamination of soil and water, air pollution, among other impacts that may alter, irreversibly at times, the natural dynamic of a territory. Such changes are observed in the Taubaté Basin, which has been affected by intense urban change over the last years (Reverte et al., 2019).

The low cost of exploitation and the proximity to large consumer centers make the extraction of sand and clay, an activity started in the 1970s, a very attractive business in the whole area of the basin. This represents a serious risk factor both to the environment and to the geodiversity, as it can cause irreversible environmental impacts.

Established by the Forest Code of 1989, the Law No. 7803 (BRAZIL, 1989) classified the floodplains of Brazilian rivers as Permanent Protection Areas (PPA). Nonetheless, many mining pits — some still active — are located in these areas (Fig. 10A), representing a permanent threat to the Paraíba river. In order to lessen the visual impact that such pits could possibly cause to the users of the Presidente Dutra highway, mining companies in the region conceal them by planting eucalyptus, covering up the environmental damage caused by mining activities (Fig. 10B).

In this context, according to Lima (2011), extensive eucalyptus planting in the Paraíba Valley is causing serious environmental damage. Water resources, animals and people are being contaminated by pesticides. According to the author, the problem is not only the monoculture of eucalyptus, but also its intensive exploitation, which occupies extensive areas, without control and without guarantees of maintenance of the soil and water of these areas for other kind of use.

Figure 10: Sand mining areas in the Taubaté Basin region. A) sand extraction pit invading a protected area, destroying riparian forest near the Paraíba do Sul river; B) Hydraulic dismantling in Jacareí, on the shores of Rodovia Dutra. Note the eucalyptus barrier planted along the highway to hide the pits.
 Source: <http://www.quimicosjc.org.br/pdfs/especiais/Cavas-de-areia-2012.pdf>
 (Accessed: 14 Feb. 2019).

Countless industries settled and cities grew along the course of the Paraíba do Sul river, dumping waste into its waters, often without any treatment (CEIVAP, 2016). According to Coelho (2012), one billion liters of domestic sewage are discharged daily into the rivers of the region and about 90% of the municipalities do not have a sewage treatment plant. Of the polluting load, approximately 86% comes from domestic effluents, a reflection of the high population concentration that grew in a disorderly manner.

This urban growth also demands infrastructure work, which is made without planning, causing significant damage to the natural resources (Fig. 11A and B). Environmental impacts that harm the fauna, the flora and the supply of such resources are common in some projects, such as the construction of Aerovale, the airport of the region, which was embargoed for environmental reasons in 2015.

Mining activity also causes serious environmental damage. In 2016 a dam broke in the city of Jacareí – SP and released its tailings in the Paraíba do Sul river (Fig. 11C). To aggravate the situation, many mining companies end their activities without promoting the land recovery that had been proposed and approved before the operating license, leaving extremely degraded areas, which interfere directly in the provision of ecosystem services (Fig. 11D).

Figure 11: Impacts caused by anthropogenic activities. A) Construction of the Aerovale airport. Source: www.aerovale-cea.com.br; B) Stratified sandstone outcrop, destroyed for the construction of a secondary road in Tremembé – SP. Source: Riccomini (1989); C) Breakage of a dam of mining pond in Jacareí; D) Environmental degradation generated by mining in Guararema. Source: Mechi & Sanchez (2010).

Given the above, it is evident that the main effects observed in the region represent direct consequences of anthropogenic actions, such as mining and urban growth. Regarding the latter, Ruppert & Duncan (2017) confirm that human intervention represents the largest negative impact factor in the ecosystem service flow, and its evaluation is fundamental to propose ways to minimize such impacts. Thus, considering the proper management of natural resources, it is important that the ecosystem services of a region should be evaluated and quantified based on the context in which they operate, and be valued and integrated in public policies for regional sustainable development.

In this context, this study demonstrates that the main cause of environmental impacts derives from anthropogenic activities, which can lead to irreversible damage to the environment and depletion of resources, in the case of mining, if there are not adequate management policies for the area. Therefore, it is important to create partnerships between the scientific community, managers, public and private institutions in order to propose ways to minimize environmental impacts allied to the needs of urban growth.

5.3 Analysis of ecosystem services based on quantification

The quantification of ecosystem services provided by the geodiversity elements of the Taubaté Basin presents a *Relative Significance* (σ_{Rel}) assigned to each service group, that is, it shows how each category can interfere in the ecosystem dynamics and, therefore, with providing these services. The values, expressed in percentage, may vary from 0 to 100, and the closer to 100, the greater the potential for interference in the ecosystem service supply (Table 8). The *Relative Significance* (σ_{Rel}) would be 100% if the sum reached 120, since $5 \max\{\sigma\} \max\{b_{i,j}\} = 120$, with $\max\{\sigma\} = 8$ e $\max\{b_{i,j}\} = 3$.

Based on the values obtained for the *Significance for the ecosystem services group* (σ_{Group}), the highest value, 61.7%, was attributed to the regulating service. The result is consistent with the impacts on the abiotic resources of the basin, especially regarding the water resources provided by the Paraíba do Sul river, being the provisioning of this service the most affected in the region due to anthropogenic activities.

The *Relative Significance of the group* (σ_{Group}) related to supporting services is 60%, the second highest value. Although the *Relative Significance* (σ_{Rel}) of some parameters reached high values (such as soil and water supply, 75.0 % and 69.2 %, respectively), the final group average was lower because it had a higher number of parameters. The high values for these parameters reflect the impacts on the “Land Use Categories”, considering that there was a significant increase in urban settlement, in mining and in forestry and a decrease of vegetation and farming areas.

The provisioning service was the least affected by the categories. The lowest *Relative Significance* (σ_{Rel}) = 25.0 was assigned to the class of metal and industrial

minerals, since the region does not have metallic minerals, only a small portion of the extracted clay minerals have industrial use, and their main use is in construction. Although other parameters, such as the provision of food, water and building materials, obtained high *Relative Significance* (σ_{Rel}) values, the *Relative Significance of the group* (σ_{Group}) was low, summing up 45.4%, as the group has a higher quantity of parameters.

Regarding the group of cultural services — which includes parameters of well-being and health, leisure, human history and scientific knowledge — the value of *Relative Significance* (σ_{Group}) group was 50%. Although it is higher when compared to the previous group, it has fewer parameters, which decreases its average. The class represented by well-being and health obtained the highest point value within the group (62.5%), due to the increase of disordered urban occupation, which reflects in the quality of life of the local population and the availability of natural resources.

FINAL CONSIDERATIONS

The qualitative assessment of the six EGVs established for the Taubate Basin region identified 53 ecosystem services distributed in four functions. This shows that the geodiversity was and is essential in promoting the local economic development, given the fact that the increase in exploitation of mineral resources fosters the growth of job offers, resulting in urban sprawl and, consequently, increasing the environmental impacts in the region.

The categorization of geodiversity elements according to specific variables was essential to direct both qualitative and quantitative assessment on the ecosystem services in the area. This brings positive perspectives on the use of these criteria on the adequate mapping of geodiversity elements using cartographic tools that can be of practical use in socio-environmental planning and policies.

The method of quantification proposed in this work allowed us to identify the relationships existing between human activities and ecosystems, highlighting which aspects interfere with the supply of these goods through the calculation of significance for loss of services. The values obtained for *Relative Significance* (σ_{Rel}) showed that the impacts caused by “Land Use Categories” mainly interfere in the provision of regulating and supporting services. It is consistent with the changes that

have affected the region over the 30 years and were evaluated in the maps.

It is noteworthy that the calculation of the significance of the loss of services can be applied in other contexts, adapting the parameters to be investigated. However, for the best use of this tool, a detailed inventory of the region to be assessed should be made, considering possible environmental impacts and analyzing the demand for ecosystem services, through the identification and description of the goods and beneficiaries.

The obtained values of significance have a great potential to contribute to the monetary valuation of the ecosystem services. Thus, the method can be used to perform other environmental assessments, serving as a subsidy for the business sector and other institution, helping incorporate the natural capital into decision making.

It is necessary to reconcile the sustainable use of resources and the process of urbanization, in order to less interfere in the availability of services when promoting spatial planning. To achieve that, it is important that the private institutions and the public administration work together and encompass human activities in an approach that enables full socioeconomic development while minimizing potential impacts on the supply of ecosystem services, through the proper management of natural resources.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank CAPES for the Academic Mobility Program PDSE Scholarship / Process Nr. 88881.135227 / 2016–01 and for the PhD research scholarship in Brazil awarded to the first author.

REFERENCES

- Ab'Saber, A.N. 2003. Os Domínios de Natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas. São Paulo, Ateliê Editorial, 160p.
- Agência Nacional de Águas (ANA). 2002. Síntese do Plano de Recursos Hídricos para a Fase Inicial da Cobrança na Bacia do Rio Paraíba do Sul. Available in: goo.gl/eKuUS2.
- Almeida, F.F.M. 1964. Fundamentos geológicos do relevo paulista. Instituto Geográfico e Geológico. Geologia do Estado de São Paulo, 41: 167–263.

- Almeida, F.F.M.; Carneiro, C.D.R. 1998. Origem e Evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências* p. 135–150.
- Bennett, D.E., Gosnell, H., Lurie, S., Duncan, S. 2014. Utility engagement with payments for watershed services in the United States. *Ecosystem Services* 8: 56–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.02.001>.
- Bernardes-de-Oliveira, M.E.C., Mandarim-de-Lacerda, A. F., Garcia, M.J., Campos, C.C. 2002. Jazigo Rodovia Quiririm–Campos do Jordão, km 11 (Tremembé), SP – Macrofósseis vegetais do Terciário. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil (SIGEP)*. Brasília–DF: Carlos Schobbenhaus, v. 1. p.55–62. Available in: < <http://sigep.cprm.gov.br/sitio087/sitio087.pdf>>.
- Boyd, J. & Banzhaf, S. 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Amsterdam, Ecological Economics*, v. 63, p. 616–626.
- BRASIL. Lei nº 7.803, de 18 de Julho de 1989. Dispõe sobre Áreas de Proteção Permanente. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7803.htm>.
- Brilha, J.; Gray, M.; Pereira, D.I.; Pereira, P. 2018. Geodiversity: An integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature. *Environmental Science & Policy*, v. 86, p. 19–28.
- Brown, T.C.; Bergstrom, J.C.; Loomis, J.B. 2007. Defining, valuing and providing ecosystem goods and services. *Albuquerque, Natural Resources Journal*, v. 47, p. 329–376.
- Bruce, J.P.; Frome, M.; Haites, E.; Janzen, H.; Lal, R. 1999. Carbon sequestration in soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, Ankeny, v. 5, p. 382–389.
- Cabral Junior, M.; Motta, J.F.M.; Mello, I.S.C.; Tanno, L.C.; Sintoni, A.; Salvador, E.D.; Chieriegatti, L.A. 2001. Recursos minerais do Fanerozóico do estado de São Paulo. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 20, n. 1,p. 105–159.
- Caldarelli, S.B. 2003. Arqueologia do Vale do Paraíba Paulista: SP – 070, Rodovia Carvalho Pinto. Instituto de Pesquisa em Arqueologia, Universidade Católica de Santos, 245p.
- Castro, M.N.; Castro, R.M.; Souza, P.C. 2013. A importância da mata ciliar no contexto da conservação do solo. *Renefara*, v. 4, n. 4, p. 230–241.
- CEIVAP, 2016. Plano integrado de recursos hídricos (PIRH) da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e Planos de ação de recursos hídricos (PARH) das bacias afluentes. 122p.
- Coelho, V.M.B., 2012: Paraíba do Sul: um rio estratégico. 1ª ed. Rio de Janeiro: Casa da Palavra, 336p.
- Coltrinari, L. 2003. Evolução Geomorfológica do Planalto de São José dos Campos (SP). PhD Thesis, Faculdade de Filosofia, letras e Ciências humanas, São Paulo: USP, 114p.
- Costanza, R., Daly, H. 1992. Natural capital and sustainable development. *Conserv. Biol.* 6 (1):37–46.
- Costanza, R.; D'Arge, R.; De Groot, R.; Farber, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O'Neill, R.V.; Paruelo, J.; Raskin, R.G.; Sutton, P.; van den Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *London, Nature*, v. 387, p. 253–260.
- CPRM, 2019. Geological Survey of Brazil. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas — SIAGAS. São Paulo. Available in: <http://siagasweb.cprm.gov.br>. Acesso em: 03 mai. 2019.
- Daily, H.E. & Farley, J. 2004. *Ecological Economics: Principles and Applications*. Washington, DC, Ed. Island Press, ed. 2, 484p.

- De Groot, R.S.; Wilson, M.A.; Boumans, R.M.J. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Amsterdam, Ecological Economics*, v. 41, p. 393–408.
- Devide, A.C.P. 2015. Sistemas agroflorestais com guanandi em terraço e várzea no Vale do Rio Paraíba do Sul, Brasil. PhD Thesis. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 215p.
- DNPM, 2016. National Department of Mineral Production. Anuário Mineral Brasileiro. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, 54p.
- Durigan, P.; Simoes, S.J.C. 2015. Avaliação geoespacial preliminar das águas subterrâneas da bacia do rio Paraíba do Sul (Porção Paulista) com base em dados SIAGAS/CPRM. *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Beolo Horizonte, p. 1–11.
- Ehrlich, P.R. & Mooney, H.A. 1983. Extinction, substitution, and ecosystem services. *BioScience* 33: 248–254. <http://dx.doi.org/10.2307/1309037>.
- Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2013. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF : Embrapa, 3ª Ed. 353 p.
- Fagundes, J. 2019. Vale do Paraíba é o maior polo produtor de variedades especiais de arroz no Brasil. *Agricultura e Abastecimento*. São Paulo, 16 aug 2019. <https://www.agricultura.sp.gov.br/noticias/vale-do-paraiba-e-o-maior-polo-produtor-de-variedades-especiais-de-arroz-no-brasil/>.
- Farley, J. 2012. Ecosystem services: The economics debate. *Ecosystem Services*, v. 1, p.40–49.
- Fernandes, F.L. & Chang, H.K. 2003. Arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté – SP. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 9., 2003, Búzios, Volume único, p. 367–370.
- Fisher, B.; Turner, R. K. ; Morling, P. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological economics*, n. 68, v.3, p.643–653.
- Garcia, M.G.M.; Del Lama, E.A.; Martins, L.; Mazoca, C.E.M.; Bourotte, C. 2019. Inventory and assessment of geosites to stimulate regional sustainable management: the northern coast of the state of São Paulo, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 91, p. 1-23.
- Garcia, M.G.M.; Brilha, J.; Lima, F.F.; Vargas, J.C.; Perez–Aguilar, A.; Alves, A.; Campanha, G.A.; Duleba, W.; Faleiros, F.M.; Fernandes, L.A.; et al. 2018. The inventory of geological heritage of the State of São Paulo, Brazil: methodological basis, results and perspectives. *Geoheritage*, 10(2), 239–258.
- Garcia, M.J.; Saad, A.R. 1996. A Paleontologia da Formação Tremembé (Bacia de Taubaté), Oligoceno do Estado de São Paulo. *Revista Universidade de Guarulhos*, ano 1, n. 2, p. 36–45.
- Gómez–Baggethun, E.; de Groot, R.; Lomas, P.L.; Montes, C. 2010. The history of ecosystem services in economic theory and practice: from early notions to markets and payment schemes. *Ecol. Econ.* 69: 1209–1218. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.007>.
- Gordon, J.E., Barron, H.F., Hansom, J.D., Thomas, M.F., 2012. Engaging with geodiversity – why it matters. *Proceedings of the Geologists’ Association* 123 (1), 1–6.
- Gray, M. 2011. Other nature: geodiversity and geosystem services. *Environmental Conservation*. 38: 271–274.
- Gray, M. 2013. Valuing and conserving abiotic nature. London, John Wiley & Sons, 508p.

- Gray, M. 2018a. Geodiversity: the backbone of geoheritage and geoconservation. In: E. Reynard & J. Brilha (Eds.) *Geoheritage: Assessment, Protection and Management*. Elsevier, p. 13–25.
- Gray, M. 2018b. The confused position of the geosciences within the “natural capital” and “ecosystem services” approaches. *Ecosystem Services*: v. 34, p. 106–112.
- Gray, M. 2019. Geodiversity, geoheritage e geoconservation for society. *Internacional Journal of Geoheritage and Parks*: (7), 226 – 236.
- Haines–Young, R., Potschin, M., 2018. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1: Guidance on the Application of the Revised Structure. www.cices.eu.
- Helliwell, D.R. 1969. Valuation of wildlife resources. *Reg. Stud.* 3:41–47. <http://dx.doi.org/10.1080/09595236900185051>.
- Hepp, L.U.; Gonçalves–Junior, J.F. 2015. A decomposição de detritos em riachos como serviço ecossistêmico de regulação e suporte prestado pela natureza. In: Lucilia Maria Parron; Junior Ruiz Garcia; Edilson Batista de Oliveira; George Gardner Brown; Rachel Bardy Prado. (Org.). *Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica*. 1ed. Brasília: EMBRAPA, p. 226–233.
- Iritani, M.A.; Ezaki, S. 2009. *As águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2. ed., 104 p.
- James, G., Witlen, D., Hastie, T., Tibshirani, R. 2013. *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R*. London, Springer, 441p.
- King, R.T. 1966. Wildlife and man. *NY Conservationist*, 20(6): 8–11.
- Lima, L.E.C. 2011. A Desertificação do Vale. *Jornal O Vale Paraibano*, Nº. 1016. São José dos Campos, 10 de julho de 2011.
- Longo, M.H.C.; Rodrigues, R.R. 2017. Análise de serviços ecossistêmicos na avaliação de impacto ambiental: proposta e aplicação em um empreendimento minerário. *Desenvolvimento e Meio Ambiente (UFPR)*, v. 43, p. 103–125.
- Lopes, M. 2014. *Ocupação Tupinambá no vale do Paraíba Paulista: vista a partir da análise do sítio arqueológico Santa Marina*. Master's Dissertation, Museu de Arqueologia e Etnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 223p.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. *Ecosystems and human well-being: current state and trends*. Washington D.C.: Island Press, v. 3. Available in: <https://www.millenniumassessment.org>
- Mechi, A.; Sanches, D.L. (2010). Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. *Estudos Avançados*, 24(68), 209–220.
- Mezzalana, S. 1989. *Os Fósseis do Estado de São Paulo*. Série Pesquisa, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Geológico, São Paulo, 142 p.
- Oliveira, J.B. de; Camargo, M.N.de; Rossi, M. & Calderano Filho, B. 1999. *Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida*. Campinas: Instituto Agrônomo/EMBRAPA Solos, 1999. v. 1. 64 p. (with map, scale 1:500 000).
- Pandeya, B.; Buytaert, W.; Zulkaf, Z.; Karpouzoglou, T.; Mao, F.; Hannah, D.M. 2016. A comparative analysis of ecosystem services valuation approaches for application at the local scale and in data scarce regions. *Ecosystem Services*, v. 22, p.250–259.
- Pereira, D. I., Pereira, P., Brilha, J., & Santos, L. (2013). Geodiversity assessment of Parana State (Brazil): An innovative approach. *Environmental Management*, 28, 1e10. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>.

- Reverte, F.C., Garcia, M.G.M., Brilha, J., & Moura, T.T. 2019. Inventário de geossítios como instrumento de gestão e preservação da memória geológica: exemplo de geossítios vulneráveis da Bacia de Taubaté (São Paulo, Brasil). *Pesquisas em Geociências*, 46(1), e0779. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.93252>.
- Riccomini, C. 1989. O rift continental do sudeste do Brasil. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 256p.
- Ross, J.L.S. 1993. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. *Revista do Departamento de Geografia*, 8:63–74.
- Ruppert, J.; Duncan, R.G. 2017. Defining and Characterizing Ecosystem Services for Education: A Delphi Study. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(6): 737–763.
- Santos, D.S. ; Mansur, K. L.; Goncalves, J.; Arruda JR, E.R.; Manosso, F.C. 2017. Quantitative assessment of geodiversity and urban growth impacts in Armação dos Búzios, Rio de Janeiro, Brazil. *APPLIED GEOGRAPHY*, v. 85, p. 184–195.
- Silva, M.L.N. 2018. Serviços Ecossistêmicos e Índices de Geodiversidade como suporte da geoconservação do Geoparque Seridó. Master's Dissertation, Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 177p.
- Sobrinho, A.M. 1978. A civilização do café. São Paulo, Brasiliense, 3ª ed., 180p.
- Schrodt, F; Bailey, J.J. kissling, W.D; Rijdsdijk, K.F.; Seijmonsbergen, A.C. Van, R.D.; Hjort, J.; Lawley, R.S.; Williams, C.N.; Anderson, M.G.; Beier, P.; Van, B., Brilha, J.; Carcavilla, L.; et al. 2019. Opinion: To advance sustainable stewardship, we must document not only biodiversity but geodiversity. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America* (online), v. 116, p. 16155–16158.
- Tansley, A.G. 1935. The use and abuse of vegetational terms and concepts. *Ecology* 16: 284 – 307.
- TEEB, 2010. In: Kumar, P. (Ed.). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. Earthscan, London and Washington DC. Available in: <http://www.teebweb.org/our-publications/teeb-study-reports/ecological-and-economic-foundations/>.
- Vidal, A.C., Fernandes, F.L., Chang, H.K. 2004. Distribuição dos arenitos da Bacia de Taubaté – SP. *Geociências UNESP*, 2(23): 55–66.
- Vidal, A.C.; Chang H.K. 2002. Caracterização Hidroquímica dos Aquíferos da Bacia da Taubaté. *Revista Brasileira de Geociências* vol. 32, nº 2, p.267–276.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A geodiversidade da Bacia de Taubaté tem contribuído ao longo dos anos para o desenvolvimento econômico e social da região do Vale do Paraíba, por meio da disponibilização de recursos naturais utilizados, especialmente, pelo homem. Esses bens variam desde a disponibilização de água e alimentos cultivados nos solos férteis de toda região à oferta de bens e serviços culturais, como o conhecimento científico produzido com base no patrimônio geológico. Embora o intemperismo influencie grandemente na deterioração dos elementos geológicos, as grandes ameaças a esses recursos têm sido, principalmente, as ações antrópicas associadas à urbanização.

Desse contexto emergiu a proposição do presente trabalho, como forma de identificar, avaliar e sugerir propostas que possam contribuir com a gestão sustentável dos bens naturais da Bacia de Taubaté, incluindo o patrimônio geológico. Considerou-se, neste trabalho, a vulnerabilidade e a fragilidade dos recursos naturais, além da oferta dos serviços ecossistêmicos prestados pela geodiversidade local.

Cabe destacar a importância desta pesquisa para a manutenção do meio natural em áreas altamente urbanizadas aliadas a zonas de mineração, como é o caso da área abrangida pela bacia. Os recursos abióticos têm sido exauridos de maneira predatória, muitas vezes sem o devido planejamento, e sua renovação não ocorrerá dentro da escala de tempo do homem.

8.1 Inventário do patrimônio geológico

A metodologia adotada para a realização do inventário do patrimônio geológico na Bacia de Taubaté considerou a definição de categorias temáticas, de modo a direcionar a seleção dos geossítios inventariados com base na história geológica local. O método possibilitou que os geossítios selecionados fossem representativos da respectiva categoria geológica, favorecendo a compreensão da instalação e da evolução tectono-sedimentar da bacia.

Os trabalhos de campo foram decisivos para perceber que muitos dos

potenciais geossítios inicialmente selecionados para compor o inventário da bacia não existem mais, não podem ser acessados ou estão altamente intemperizados. Esses fatos confirmam a vulnerabilidade e a fragilidade que afetam o patrimônio geológico da região, com destaque para as atividades antrópicas, responsáveis pela destruição de inúmeros locais de interesse geológico em virtude do crescimento urbano regional, que demanda melhorias por meio de obras de infraestrutura para comodidade da população local.

Cabe ressaltar que os conceitos definidos neste inventário — tanto os que se referem aos geossítios quanto às categorias geológicas — podem ser adaptados para outros trabalhos, inclusive no âmbito de um inventário de maior abrangência, como por exemplo, estadual ou nacional.

8.2 Quantificação e avaliação da perda do valor científico

A quantificação dos geossítios da bacia foi realizada por meio da plataforma disponibilizada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), o GEOSSIT. Os dados obtidos confirmaram o valor científico do patrimônio geológico e o alto risco de degradação dos geossítios.

Os resultados da quantificação mostraram que a maioria dos geossítios encontra-se ameaçada, principalmente por atividade antrópica, embora o intemperismo também contribua, de forma significativa, para o estado de conservação desses locais, especialmente aqueles situados em cortes de estrada.

Nesse sentido, o caráter extremamente frágil e vulnerável das exposições de rochas e estruturas na região da bacia representa um fator de risco à perda do patrimônio geológico, seja decorrente de destruição em virtude de atividades antrópicas ou da perda do valor científico por fatores intrínsecos, acarretando na descaracterização do geossítio. Assim, a partir dos valores obtidos na avaliação quantitativa foi possível identificar as ameaças e sugerir medidas de proteção.

A quantificação do risco de degradação também possibilitou avaliar a perda do valor científico do patrimônio geológico com base no estado de conservação dos geossítios. Foram consideradas as condições atuais de observação dos aspectos principais que atribuíram valor científico ao geossítio, bem como os fatores intrínsecos e antrópicos que atenuam a qualidade de observação dessas áreas, o

que pareceu ser pertinente na avaliação da manutenção ou perda do referido valor.

8.3 Identificação e quantificação da perda dos serviços ecossistêmicos

A identificação dos serviços ecossistêmicos foi realizada por meio da avaliação qualitativa da geodiversidade da bacia. Considerando os aspectos físicos, foram definidas seis variáveis da geodiversidade (seguindo a nomenclatura de Schort, 2019), como forma de facilitar a caracterização desses serviços. Assim, foram identificados e caracterizados 53 serviços distribuídos pelas quatro funções ecossistêmicas: regulação, provisão, suporte e cultural. Esses dados demonstram como a geodiversidade tem sido fundamental para o desenvolvimento econômico da bacia, especialmente no que se refere à extração mineral, com destaque para a exploração de areia ao longo do rio Paraíba do Sul.

Nesse contexto, embora a Lei nº 7.803 (BRASIL, 1989) configure as várzeas dos rios brasileiros como Áreas de Proteção Permanente (APP), muitas das cavas de mineração de areia da região se encontram nessas áreas, representando uma ameaça permanente ao equilíbrio dos processos dinâmicos do rio Paraíba do Sul. Isso pode influenciar de forma negativa a oferta dos serviços ecossistêmicos locais.

Apesar de causarem danos ambientais, as mineradoras contribuem para a economia local por meio da geração de empregos em todo Vale do Paraíba, embora existam outros segmentos empresariais na região que também atraem a população na busca de melhores condições de vida. Em São José dos Campos, por exemplo, empresas de diversos setores — dentre instituições de ensino e pesquisa, entidades da sociedade civil e segmentos aeroespaciais, como a Embraer — integram o chamado Parque Tecnológico São José dos Campos, instituído pelo Decreto Municipal nº 12.367/2006, e que representa atualmente o maior complexo de tecnologia e inovação do Brasil. O município, que tem um dos melhores IDHs do país e população estimada de 721 mil habitantes (IBGE, 2019), é considerado também uma estância climática em virtude de suas águas termais, utilizadas desde a década de 1960 para tratamento de tuberculosos (Zanetti *et al*, 2017).

A oferta de emprego, aliada ao aumento da qualidade de vida, tem acelerado o processo de expansão urbana, que além de comprometer a oferta de bens naturais, pode modificar consideravelmente a paisagem, como ocorreu na bacia. O

mapeamento do uso e ocupação do solo mostrou que a extração mineral, a silvicultura e a expansão urbana aumentaram consideravelmente ao longo de 30 anos, representando os principais fatores de alteração do uso do solo na região.

Conforme demonstrado, essa alteração no meio natural pode comprometer a disponibilização de bens naturais, por isso foi proposto um método para quantificação da perda dos serviços, com base nas categorias de uso e ocupação do solo definidas. O método permitiu identificar as relações existentes entre as atividades antrópicas e os ecossistemas, destacando os aspectos que interferem na oferta desses bens através do cálculo de significância para perda dos serviços.

Os valores obtidos demonstraram que os impactos decorrentes do crescimento urbano interferem principalmente na disponibilização dos serviços de regulação e suporte, o que é coerente com as ameaças ao rio Paraíba do Sul.

8.4 Conclusões e perspectivas

Este trabalho abordou a temática da geodiversidade na região da Bacia de Taubaté com o propósito de compreender as relações existentes entre os elementos da geodiversidade, o patrimônio geológico e os serviços ecossistêmicos, os quais influenciaram fortemente o desenvolvimento socioeconômico de toda a região do Vale do Paraíba, mas que se encontram ameaçados.

Dentre as ameaças, o intemperismo e a expansão urbana configuram os principais fatores de risco de degradação dos geossítios. Nesse caso, inseri-los no planejamento de políticas públicas para gestão territorial representa uma maneira de contribuir com a proteção de parte do patrimônio geológico, especialmente daqueles ameaçados por atividades antrópicas.

Por esse motivo, foi fundamental realizar o inventário do patrimônio geológico local, pois ao conhecer o patrimônio torna-se viável propor meios para conservá-lo ou para minimizar possíveis impactos.

Um produto importante gerado a partir dos dados do inventário foi a identificação dos serviços ecossistêmicos prestados pela geodiversidade, que pode servir como suporte à conservação e ao manejo dos recursos naturais da região. No entanto, o crescimento urbano, que continua em expansão, não ocorreu de forma planejada e isso tem comprometido a gestão dos recursos naturais, incidindo

diretamente em sua oferta à população local.

Por esse motivo, conhecer e compreender a geodiversidade e suas inter-relações representa uma forma de contribuir com a gestão e valorização dos recursos naturais, para que se promova o desenvolvimento sustentável aliado às necessidades de expansão urbana, cuja demanda por recursos é extremamente alta na região.

Para tanto, é fundamental que os órgãos públicos, privados e a comunidade científica estabeleçam relações de parceria para que juntas possam propor soluções que visem a manutenção dos recursos da geodiversidade. Cabe aos geocientistas produzir e difundir conhecimento geocientífico que contribua efetivamente para conscientizar a população sobre a importância da conservação do meio físico para a qualidade de vida, e aos órgãos públicos e privados o empenho em aplicar esse conhecimento para transformar a sociedade em um lugar melhor para se viver.

É fundamental, portanto, que sejam desenvolvidos métodos que fortaleçam e consolidem a geoconservação como ciência, estabelecendo critérios que demonstrem a importância da conservação da geodiversidade e do patrimônio geológico na manutenção de um meio ambiente equilibrado.

Assim, espera-se que este trabalho possa contribuir com a criação de diretrizes que auxiliem o desenvolvimento de ações para a geoconservação, principalmente em áreas urbanizadas como as da bacia, colaborando com a gestão dos recursos naturais e com a oferta de bens e serviços, essenciais à vida.

9. REFERÊNCIAS

- Ab'Saber, A.N. 2003. Os domínios da natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo, Ateliê Editorial, 160p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2001. Bacia do Rio Paraíba do Sul: livro da bacia. Rio de Janeiro, ANA, 68p.
- Almeida, F.F.M. 1958. Vale do Paraíba. In: Relatório anual do diretor. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, 139:90-91.
- Almeida F.F.M. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. Rio de Janeiro: DNPM/DGM. Boletim 241: 1-36.
- Almeida, F.F.M., Carneiro, C.D.R. 1998. Origem e Evolução da Serra do Mar. Revista Brasileira de Geociências p. 135-150.
- Andrade, D.C., Romeiro, A.R. 2009. Capital natural, serviços ecossistêmicos e sistema econômico: rumo a uma Economia dos Ecossistemas. Texto para Discussão. IE/UNICAMP, n. 159. application at the local scale and in data scarce regions. Ecosystem Services, 22(2): 250-259.
- Andrade, D.J., Souza, A.A.M., Gomes, C. 2019. Análise temporal da expansão urbana nos municípios do Vale do Paraíba Paulista. MERCATOR (FORTALEZA. ONLINE), v. 18, p. 1-15.
- Arruda, K.E.C., Garcia, M.G.M., Del Lama, E.A. 2017a. Inventário e quantificação do patrimônio geológico do município de Caraguatatuba, São Paulo. Revista Geociências UNESP, 36(3): 447-462.
- Arruda, K.E.C., Garcia, M.G.M., Del Lama, E.A., Mucivuna, V.C., Reverte, F.C. 2017b. Selection method and proposals to the use of geodiversity sites: the case of the north coast of São Paulo State, Brazil. Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ, 40(3): 24-47.
- Asmus, H.E., Ferrari, A.L. 1978. Hipótese sobre a causa do tectonismo cenozoico na região sudeste do Brasil. In: PETROBRÁS. Aspectos estruturais da margem continental leste e sudeste do Brasil. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES/DINTEP. p.75-88.
- Bennett, D.E., Gosnell, H., Lurie, S., Duncan, S. 2014. Utility engagement with payments for watershed services in the United States. Ecosystem Services 8: 56–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.02.001>.
- Bernardes-de-Oliveira, M.E.C., Mandarim-de-Lacerda, A.F., Garcia, M.J., Campos, C.C. 2002. Jazigo Rodovia Quiririm-Campos do Jordão, km 11 (Tremembé), SP - Macrofósseis vegetais do Terciário. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil (SIGEP). Brasília-DF: Carlos Schobbenhaus, v. 1. p.55-62. <http://sigep.cprm.gov.br/sitio087/sitio087.pdf> (acessado Setembro 2019).

- Boyd, J., Banzhaf, S. 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. Amsterdam, Ecological Economics, v. 63, p. 616- 626.
- BRASIL. Lei nº 7.803, de 18 de Julho de 1989. Dispõe sobre Áreas de Proteção Permanente. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7803.htm>. Acesso em: 01 set. 2019.
- Brilha, J. 2005. Patrimônio Geológico e Geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica. Palimage Editora, 190p.
- Brilha, J. 2016. Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage*, 8(2): 119-134.
- Brilha, J., Gray, M., Pereira, D.I., Pereira, P. 2018. Geodiversity: An integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature. *Environmental Science & Policy*, v. 86, p. 19-28.
- Brown, T.C., Bergstrom, J.C., Loomis, J.B. 2007. Defining, valuing and providing ecosystem goods and services. *Albuquerque, Natural Resources Journal*, v. 47, p. 329-376.
- Burek, C.V., Prosser, C.D., 2008. The history of geoconservation: an introduction. In: Burek, C.V., Prosser, C.D. (Eds.), *The History of Geoconservation*. Geological Society. Special Publications 300, pp. 1–5.
- Cabral Junior, M., Motta, J.F.M., Mello, I.S.C., Tanno, L.C., Sintoni, A., Salvador, E.D., Chieregatti, L.A. 2001. Recursos minerais do Fanerozóico do estado de São Paulo. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 20, n. 1, p. 105-159.
- Campanha, V.A. 1994. A arquitetura deposicional da Bacia Sedimentar de Taubaté, SP, como subsídio à delimitação das zonas de produção mineral. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto Geociências e Ciência Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1994. v. 1, 193 p. e v. 2, 91 p.
- Carvalho, A.M.A., Vidal, A.C., Chang, H.K. 2011. Delimitação do embasamento da Bacia de Taubaté. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, 11(1), 19-32.
- Chang, H.K., Appi, C.J., Riccomini, C., Castro, J.C., Arai, M., Freitas, E.L., Santos Neto, F.V. 1989. Geologia da Bacia de Taubaté. *Simpósio de Geologia do Sudeste*, 1., Bol. Res., Rio de Janeiro, SBG 10p.
- Coltrinari, L. 2003. Evolução Geomorfológica do Planalto de São Jose dos Campos (SP). Tese de livre docência em Geografia, Faculdade de Filosofia, letras e Ciências humanas, São Paulo: USP, 114p.
- Costanza, R., Daly, H. 1992. Natural capital and sustainable development. *Conserv. Biol.* 6 (1):37–46.

- Costanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., Van Den Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. London, *Nature*, v. 387, p. 253-260.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS. São Paulo, 2019. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br>. Acesso em: 03 mai. 2019.
- Daily, G. 1997. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystem*. Washington: Island Press, 392p.
- Daily, H.E., Farley, J. 2004. *Ecological Economics: Principles and Applications*. Washington, DC, Ed. Island Press, ed. 2, 484p.
- De Groot, R.S. 1992. *Functions of Nature: Evaluation of Nature in Environmental Planning, Management and Decision Making*. Wolters-Noordhoff, Groningen.
- De Groot, R.S., J. van der Perk, A.Chiesura, S. Marguliew, 2000. Ecological Functions and Socio-economic Values of Critical Natural Capital as a measure for Ecological Integrity and Environmental Health (pp. 191-214). in: P.Crabbe, A.Holland, L.Ryszkowski and L.Westra (eds.) "Implementing Ecological Integrity: restoring regional and global environmental and Human Health". NATO-Science Series, IV. Earth and Environmental Sciences Vol.1, Kluwer Ac. Publ. BV, Dordrecht/Boston/London
- De Groot, R.S., Wilson, M.A., Boumans, R.M.J. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Amsterdam, Ecological Economics*, v. 41, p. 393-408.
- Del Lama, E.A., Bacci, D.D.L.C., Martins, L., Garcia, M.G.M., Dehira, L.K. 2015. Urban geotourism and the old centre of São Paulo city, Brazil. *Geoheritage*, v. 7, n. 2, p. 147-164.
- Devide, A.C.P. 2015. *Sistemas agroflorestais com guanandi em terraço e várzea no Vale do Rio Paraíba do Sul, Brasil. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Curso de Pós-graduação em Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 215p.*
- Dixon, G. 1996. *Geoconservation: an international review and strategy for Tasmania*. Parks and Wildlife Service, Tasmania, Hobart, Occasional Paper 35
- DNPM. Departamento Nacional da Produção Mineral. 2016. *Anuário Mineral Brasileiro*. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, 54p.
- Ehrlich, P.R., Mooney, H.A. 1983. Extinction, substitution, and ecosystem services. *BioScience* 33: 248–254. <http://dx.doi.org/10.2307/1309037>.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2013. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília, DF : Embrapa, 3ª Ed. 353p.

- Farber, S., Costanza, R., Childers, D.L., Erickson, J., Gross, K., Grove, M., Hopkinson, C.S., Kahn, J., Pincetl, S., Troy, A., Warren, P., Wilson, M. 2006. Linking Ecology and Economics for Ecosystem Management. *BioScience*, 56:121-133.
- Farley, J. 2012. Ecosystem services: The economics debate. *Ecosystem Services*, v. 1, p.40-49.
- Fernandes, F.L. 1993. Arcabouço estrutural e evolução da Bacia de Taubaté - SP. MS Dissertation, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 147p.
- Fernandes, F.L., Chang, H.K. 2001. Modelagem gravimétrica da Bacia de Taubaté - Vale do Rio Paraíba do Sul, leste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19: 131-144.
- Ferrari A.L., 2001. Evolução tectônica do Graben da Guanabara. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, p. 412.
- Fisher, B.; Turner, R. K. ; Morling, P. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological economics*, n. 68, v.3, p.643-653.
- Garcia, M.G.M. 2019. Ecosystem Services Provided by Geodiversity: Preliminary Assessment and Perspectives for the Sustainable Use of Natural Resources in the Coastal Region of the State of São Paulo, Southeastern Brazil. *Geoheritage*, p. 1.
- Garcia, M.G.M., Brilha, J., Lima, F.F., Vargas, J.C., Perez-Aguilar, A., Alves, A., Campanha, G.A., Duleba, W., Faleiros, F.M., Fernandes, L.A., Fierz, M.S., Garcia, M.J., Janasi, V.A., Martins, L., Raposo, M.I., Ricardi-Branco, F., Ross, J.L., Sallun Filho, W., Souza, C.R., Bernardes-de-Oliveira, M.E., Neves, B.B., Neto, M.C., Christofoletti, S.R., Henrique-Pinto, R., Lobo, H.A., Machado, R., Passarelli, C.R., Perinotto, J.A., Ribeiro, R.R., Shimada H. 2018. The inventory of geological heritage of the State of São Paulo, Brazil: methodological basis, results and perspectives. *Geoheritage*, 10(2), 239-258.
- Garcia, M.G.M., Del Lama, E.A., Martins, L., Mazoca, C.E.M., Bourotte, C. 2019. Inventory and assessment of geosites to stimulate regional sustainable management: the northern coast of the state of São Paulo, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (online), v. 91, p. 1.
- Garcia, M.J. 1994. Palinologia de Turfeiras Quaternárias do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, Estado de São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, 354p.
- Garcia, M.J., Saad, A.R. 1996. A Paleontologia da Formação Tremembé (Bacia de Taubaté), Oligoceno do Estado de São Paulo. *Revista Universidade de Guarulhos*, ano 1, n. 2, p. 36-45.
- García-Cortés, A., Carcavilla, L.U. 2009. Documento metodológico para la elaboración del Inventario Español de lugares de interés geológico (IELIG). 2.

ed. Madrid, Instituto Geológico y Minero de España, 64 p. Versão de 18-07-2013.

- García-Ortiz, E., Fuertes-Gutiérrez, I., Fernández-Martínez, E. 2014. Concepts and terminology for the risk of degradation of geological heritage sites: fragility and natural vulnerability, a case study. *Proceedings of the Geologists' Association*, v. 125, 463-479.
- Gómez-Baggethun, E., De Groot, R., Lomas, P.L., Montes, C. 2010. The history of ecosystem services in economic theory and practice: from early notions to markets and payment schemes. *Ecol. Econ.* 69: 1209–1218. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.007>.
- Gordon, J.E., Barron, H.F., Hansom, J.D., Thomas, M.F., 2012. Engaging with geodiversity – why it matters. *Proceedings of the Geologists' Association* 123 (1), 1–6.
- Gray, M. 2004. *Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, 434 p.
- Gray, M. 2011. Other nature: geodiversity and geosystem services. *Environmental Conservation*. 38: 271–274.
- Gray, M. 2013. *Valuing and conserving abiotic nature*. Londres, John Wiley & Sons, 508p.
- Gray, M. 2018a. Geodiversity: the backbone of geoheritage and geoconservation. In: E. Reynard & J. Brilha (Eds.) *Geoheritage: Assessment, Protection and Management*. Elsevier, p. 13-25.
- Gray, M. 2018b. The confused position of the geosciences within the “natural capital” and “ecosystem services” approaches. *Ecosystem Services*, 34: 106–112.
- Gray, M., Gordon, J.E., Brown, E.J. 2013. Geodiversity and the ecosystem approach: the contribution of geoscience in delivering integrated environmental management. *Proceedings of the Geologist's Association*, 124(4): 659-73.
- Haines-Young, R., Potschin, M., 2018. *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1: Guidance on the Application of the Revised Structure*. www.cices.eu.
- Hasui, Y., Ponçano, W.L. 1978. Organização estrutural e evolução na Bacia de Taubaté. In: 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Actas, v. 1, p. 368-381.
- Helliwell, D.R. 1969. Valuation of wildlife resources. *Reg. Stud.* 3:41–47. <http://dx.doi.org/10.1080/09595236900185051>.
- Henriques, M.H., Reis, R.P., Mota, T., Brilha, J. 2011. Geoconservation as an Emerging Geoscience. *Geoheritage*, 3(1): 117-128.

- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. URL: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html>. Acesso:20.02.2019.
- IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1981. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 2 v., escala 1:1.000.000.
- IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 2015. Ordenamento Territorial Geomineiro. Área: Região Metropolitana do Vale do Paraíba. Bases Preliminares – Relatório Final, SEE/SSM.
- Iritani, M.A., Ezaki, S. 2009. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2. ed., 104 p.
- James, G., Witlen, D., Hastie, T., Tibshirani, R. 2013. An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R. London, Springer, 441p.
- Johansson, C.E. 2000. Geodiversitet i Nordisk Naturvard. Nordisk Ministerraad, Copenhagen.
- Kiernan, K. 1994. The geoconservation significance of Lake Pedder and its contribution to geodiversity. Unpublished Report to the Lake Pedder Study Group.
- Kiernan, K. 1997. The conservation of landforms of coastal origin. Forest Practices Board, Hobart.
- King, R.T. 1966. Wildlife and man. NY Conservationist, 20(6): 8–11.
- Kozłowski, S. 2004. Geodiversity. The concept and scope of geodiversity. Polish geological review, 52: 833-839.
- Kremen, C. 2005. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? Oxford, Ecology Letters, v. 8, p. 468-479.
- Liccardo, A., Mantesso Neto, V., Piekarz, G.F. 2012. Geoturismo Urbano - Educação e Cultura. Anuário do Instituto de Geociências (Online), 35(1): 133-141.
- Longo, M.H.C.; Rodrigues, R.R. Análise de serviços ecossistêmicos na avaliação de impacto ambiental: proposta e aplicação em um empreendimento mineral. Desenvolvimento e Meio Ambiente (UFPR), v. 43, p. 103-125, 2017.
- Machado, V.F. 2005. A produção do discurso do desenvolvimento sustentável: de Estocolmo a Rio 92. Brasília. Tese de Doutorado em Desenvolvimento Sustentável, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília.
- Mansur, K.L. 2010. Ordenamento Territorial e Geoconservação: Análise das Normas Legais Aplicáveis no Brasil e um Caso de Estudo no Estado do Rio de Janeiro. Revista Geociências UNESP, 29: 237-349.

- Marques A., 1990. Evolução tectono-sedimentar e perspectivas exploratórias da Bacia de Taubaté, São Paulo, Brasil. Boletim de Geociências da Petrobras 4: 221–240.
- MEA. Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and human well-being: current state and trends. Washington D.C.: Island Press, v. 3. Disponível em: <https://www.millenniumassessment.org>
- Mechi, A., Sanches, D.L. 2010. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. Estudos Avançados, 24(68), 209-220. <https://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142010000100016>.
- Mezzalira, S. 1989. Os Fósseis do Estado de São Paulo. Série Pesquisa, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Geológico, São Paulo, 142 p.
- Mochiutti, N.F., Guimarães, G.B., Melo, M.S. 2011. Os Valores da Geodiversidade na Região de Pirai da Serra, Paraná. Revista Geociências UNESP, 30(4): 651-668.
- Moura, P., Garcia, M.G., Brilha, J., Amaral, W.S. 2017. Conservation of geosites as a tool to protect geoheritage: the inventory of Ceará Central Domain, Borborema Province - NE/Brazil. Annals of the Brazilian Academy of Sciences, 89(4), 2625–2645.
- Moura, T.T. 2015. Estruturas transversais às bacias de Taubaté e Resende: natureza e possível continuidade na bacia de Santos, Brasil. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 96 p.
- Mucivuna, V.C., Garcia, M.G.M., Del Lama, E.A. 2017. Inventário e avaliação quantitativa do patrimônio geológico do município de Bertoga, SP. Revista Pesquisas em Geociências (UFRGS), 44: 293-321.
- Nascimento, E.P. 2012. Trajetória da sustentabilidade: do social ao ambiental, do ambiental ao econômico. Estudos Avançados (USP. Impresso) , v. 26, p. 51-64, 2012.
- Nascimento M., Ruchkys U., Mantesso-Neto V. 2008. Geodiversidade, geoconservação e geoturismo: trinômio importante para a conservação do patrimônio geológico. Ed. Sociedade Brasileira de Geologia, 82 p.
- Nascimento, M.A.L., Silva, M.L.N., Bezerra, G.B. 2016. Centro Histórico da cidade de Natal: roteiro geoturístico por monumentos construídos com diferentes rochas. Conhecimento Prático: Geografia, São Paulo, v. 64, p. 52 – 59.
- Nimer, E. 1989. Climatologia do Brasil, IBGE, Departamento de recursos Ambientais: Rio de Janeiro, 422 p
- Oliveira, J.B., Camargo, M.N., Rossi, M., Calderano Filho, B. 1999. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônomo/EMBRAPA Solos, 1999. v. 1. 64 p. (inclui Mapa, escala 1:500.000).

- Pereira, R.G.F.A. 2010. Geoconservação e desenvolvimento sustentável na Chapada Diamantina (Bahia - Brasil). Tese de Doutorado, Escola de Ciências da Universidade do Minho (Portugal). p. 318.
- Piekarz, G.F., Liccardo, A. 2007. Turismo Geológico na Rota dos Tropeiros, Paraná. *Revista Global Tourism (Online)*, v. 3, p. 1-18.
- Prochoroff, R. 2014. O patrimônio geológico de Ilhabela – SP: estratégias de geoconservação. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 199 p.
- Queiróz, D.S., Garcia, M.G.M. 2017. Expansão urbana como ameaça à geodiversidade: estudo de caso em Santos-SP. In: Os desafios da geografia física na fronteira do conhecimento. 1ª ed. Campinas: UNICAMP, v.1, p. 3102-3111.
- Rampanelli, A.M., Saad, A.R., Etchebehere, M.L.C., Casado, F.C., Araujo Neto, E. 2011. Recursos Naturais da Bacia Sedimentar de Taubaté como Fator de Desenvolvimento Socioeconômico: um Estudo Aplicado aos Municípios de Taubaté e Tremembé, estado de São Paulo. *Geociências (São Paulo. Impresso)*, v. 30, p. 327-343.
- Reverte, F.C. 2014. Avaliação da Geodiversidade em São Sebastião – SP como patrimônio geológico. Dissertação de Mestrado, IGc/USP, 208p.
- Reverte, F.C., Garcia, M.G.M. 2016a. The geological heritage of São Sebastião, SP: Inventory and potential use of geosites with scientific value. *Revista de Geociências da UNESP*, 35(4): 495-511.
- Reverte, F.C., Garcia, M.G.M. 2016b. Quantitative Evaluation of Geological Heritage: Application to Geosites of São Sebastião, Northern Coast of São Paulo. *Anuário do Instituto de Geociências (Online)* 39: 43-56.
- Reverte, F.C., Garcia, M.G.M. 2017. Pico de Itapeva: exemplo de Geossítio Geomorfológico do inventário da Bacia de Taubaté. In: I Simpósio de Geodiversidade e Geoconservação do Estado de Goiás. Goiânia, v. 1. p. 73-77.
- Reverte, F.C., Garcia, M.G.M., Brilha, J., Moura, T.T. 2019. Inventário de geossítios como instrumento de gestão e preservação da memória geológica: exemplo de geossítios vulneráveis da Bacia de Taubaté (São Paulo, Brasil). *Pesquisas em Geociências*, 46(1), e0779. doi:<https://doi.org/10.22456/1807-9806.93252>
- Reverte, F.C., Garcia, M.G.M., Brilha, J., Pellejero, A.U. Assessment of loss of ecosystem services due to urban expansion: a case–study based on the geodiversity of Taubaté Basin, Brazil. (submetido).
- Riccomini, C. 1989. O rift continental do sudeste do Brasil. 256p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- Riccomini, C., Appi, C.J., Freitas, E.L., Arai, M. 1987. Tectônica e sedimentação no sistema de rifts continentais da Serra do Mar (Bacias de Volta Redonda, Resende, Taubaté e São Paulo). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA RJ-ES, 1., 1987. Anais do 1º Simpósio de Geologia RJ-ES, v. 1, p.253-298.
- Riccomini, C., Sant'anna, L.G., Ferrari, A.L. 2004. Evolução geológica do rifte continental do sudeste do Brasil. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., et al. (eds). Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Beca Produções Culturais Ltda, p. 383-406.
- Riccomini C., Velázquez V.F., Gomes C.B., 2005. Tectonic controls of the Mesozoic and Cenozoic alkaline magmatism in central-southeastern Brazilian Platform. In: Gomes C.B. and Comin-Chiaramonti P., orgs., Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform. São Paulo, EDUSP-FAPESP, p. 31–55.
- Rocha, A.J.D., Lima, E., Schobbenhaus, C. 2016. Aplicativo GEOSIT – nova versão. In: Anais do 48º Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre – RS.
- Ross, J.L.S. 1993. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. Revista do Departamento de Geografia, 8:63-74.
- Saad, A.R. 1990. Potencial econômico da Bacia de Taubaté (Cenozóico do Estado de São Paulo) nas regiões de Jacareí, Taubaté, Tremembé e Pindamonhangaba. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1990. 173 p.
- Salvador, E.D. 1994. Análise tectônica do vale do Rio Paraíba do Sul compreendida entre Cruzeiro (SP) e Itatiaia (RJ). MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 129 p.
- Schrodt, F; Bailey, J.J. kissling, W.D; Rijdsdijk, K.F.; Seijmonsbergen, A.C. Van, R.D.; Hjort, J.; Lawley, R.S.; Williams, C.N.; Anderson, M.G.; Beier, P.; Van, B., Brilha, J.; Carcavilla, L., et al. 2019. Opinion: To advance sustainable stewardship, we must document not only biodiversity but geodiversity. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America (online), v. 116, p. 16155-16158.
- SMA. Secretaria de Meio Ambiente. 2008. Avaliação da recuperação ambiental da mineração de areia para aperfeiçoar os instrumentos de gestão: várzea do Paraíba do Sul - trecho Jacareí Pindamonhangaba. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Coordenadoria de Planejamento Ambiental; coordenação Lina Maria Aché, Sônia Aparecida Abissi Nogueira e Neide Araújo; equipe técnica executora Antônio José Dias et al. São Paulo: SMA, 2008.
- Sharples, C. 1993. A methodology for the identification of significant landforms and geological sites for geoconservation purposes. Forestry Commission, Tasmania.

- Sharples, C. 2002. Concepts and Principles of Geoconservation. Disponível em Tasmanian Parks & Wildlife Service, Australia, [http://www.dpiw.tas.gov.au/inter.nsf/Attachments/SJON-57W3YM/\\$FILE/geoconservation.pdf](http://www.dpiw.tas.gov.au/inter.nsf/Attachments/SJON-57W3YM/$FILE/geoconservation.pdf).
- Silva, M.L.N. 2018. Serviços Ecossistêmicos e Índices de Geodiversidade como suporte da geoconservação do Geoparque Seridó. Dissertação de mestrado, Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 177p.
- Silva, M.L.N., Nascimento, M.A.L. 2016. Os Valores da Geodiversidade de Acordo com os Serviços Ecossistêmicos Sensu Murray Gray Aplicados a Estudos *In Situ* na Cidade do Natal (RN). Caderno de Geografia, v. 26, p. 338-354.
- Simi, R., Simi Junior, R., Rudorff, B.F.T. 2009. Monitoramento e Análise da Evolução das Cavas de Areia na Várzea do Rio Paraíba do Sul. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: INPE, p. 5467-5474.
- Sobrinho, A.M. 1978. A civilização do café. São Paulo, Brasiliense, 3ª ed., 180p.
- Stanley, M. 2001. Welcome to the 21st century. Geodiversity Update, 1:1-8.
- Stanley, M. 2004. Geodiversity – linking people, landscapes and their culture. In: Natural and Cultural Landscapes – The Geological Foundation, M. A. Parks (Ed.). Royal Irish Academy, Dublin, Ireland, p. 47 - 52.
- Tansley AG. 1935. The use and abuse of vegetational terms and concepts. Ecology 16: 284 – 307.
- Teeb, 2010. In: Kumar, P. (Ed.). The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations. Earthscan, London and Washington DC. Disponível em: <http://www.teebweb.org/our-publications/teeb-study-reports/ecological-and-economic-foundations/>.
- Vidal, A.C., Chang H.K. 2002. Caracterização Hidroquímica Dos Aquíferos Da Bacia De Taubaté. Revista Brasileira de Geociências vol. 32, nº 2, p.267-276.
- Vidal, A.C., Fernandes, F.L., Chang, H.K. 2004. Distribuição dos arenitos da Bacia de Taubaté – SP. Geociências, 2(23): 55-66.
- Zalán P.V., Oliveira J.A.B. 2005. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. Boletim de Geociências da Petrobras 13, 269–300.
- Zanetti, V., Papali, M.A., Costa, S.M.F. 2017. Uma análise geo-histórica da construção de um mito em São José dos Campos (SP) entre 1930 e 1964. Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, p. 1-18.