

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Avaliação da geodiversidade como base para estratégias de geoconservação em áreas protegidas: estudo aplicado ao Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Caraguatatuba (SP)

LAURA PEREIRA BALAGUER

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Mineralogia e Petrologia da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências
Área de concentração: Mineralogia Experimental e Aplicada
Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria da Glória Motta Garcia

SÃO PAULO

2022

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

Pereira Balaguer, Laura
Avaliação da geodiversidade como base para estratégias de geoconservação em áreas protegidas: estudo aplicado ao Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Caraguatatuba (SP) / Laura Pereira Balaguer; orientadora Maria da Glória Motta Garcia.
-- São Paulo, .
125 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia) -- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, .

1. áreas protegidas. 2. geodiversidade. 3. geoconservação. 4. mapeamento geoambiental. 5. serviços ecossistêmicos. I. Motta Garcia, Maria da Glória, orient. II. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**AVALIAÇÃO DA GEODIVERSIDADE COMO BASE PARA ESTRATÉGIAS DE
GEOCONSERVAÇÃO EM ÁREAS PROTEGIDAS: ESTUDO APLICADO AO
PARQUE ESTADUAL DA SERRA DO MAR - NÚCLEO CARAGUATATUBA (SP)**

LAURA PEREIRA BALAGUER

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

Dissertação de Mestrado

Nº 882

COMISSÃO JULGADORA

Dr^a. Maria da Glória Motta Garcia

Dr. Paulo Pereira

Dr^a. Joana Paula Sanchez

SÃO PAULO

2022

À minha família

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado concedida (130693/2020-0) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), chamada FAPESP/BIOTA-SIMA-FF (2019/19527-5), pelo projeto temático.

À Prof.^a Dr.^a Maria da Glória Motta Garcia meus sinceros agradecimentos pela cuidadosa orientação e dedicação à pesquisa, que contribuiu imensamente desde a etapa de projeto à realização do trabalho final.

À Dr.^a Lígia Maria de Almeida Leite Ribeiro pela atenção e coorientação também desde a construção do projeto ao produto, que muito enriqueceu as discussões levantadas, principalmente em atividades de campo.

Ao Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Caraguatatuba pela abertura aos projetos relativos à Geoconservação e, em especial, ao gestor Miguel Nema pela disponibilidade, participação e concessão de materiais.

À minha família, Vera Lúcia, Vicente e Otávio, que sempre me incentivaram e apoiaram aos estudos, bem como comemoraram minhas conquistas neste âmbito. Em especial ao Otávio, irmão querido que compartilhou muitos dos momentos universitários entre os anos de 2015 e 2017. Agradeço também ao resumo em espanhol.

As amigas que construí ao longo desses oito anos de estadia na Universidade de São Paulo e que comigo compartilharam experiências acadêmicas e pessoais, agradeço: à Lígia Dona, Gabriela Basotti e Pamela Basotti. Aos amigos LiGEAnos, de graduação, em especial ao Leonardo Alvim, Érica Souza, Júlia Gonçalves, Paula Suelem, Jonathan Pereira, Guilherme Amaral e Mariana Marques.

Ao José Renato, que contribuiu para a construção deste trabalho, que se iniciou no apoio desde a graduação. Agradeço o incentivo e apoio, inclusive no aprendizado de QGIS.

Ao Bruno Bordini, meu companheiro, que acompanhou os momentos finais desta jornada e contribuiu direta e indiretamente à finalização desta etapa.

Agradeço aos amigos de pós-graduação pelas discussões e disciplinas compartilhadas, mesmo que a distância. Em especial à Eliana Mazzucato (pelo trabalho em conjunto no PESH – NuCar), Débora Queiroz (pelo apoio e orientação ao ingresso na pós-graduação), Fernanda Reverte e Vanessa Mucivuna. Aos demais colegas por me acolherem na sala B-09.

Agradeço à toda a equipe GeoHereditas pelo acolhimento ainda na graduação e inserção às discussões, reuniões e eventos, estes que pude participar ativamente, inclusive na organização, como no VI Simpósio Brasileiro de Patrimônio Geológico.

Aos professores que desde a graduação me acompanharam: Denise Bacci, Christine Bourotte, Paulo Boggiani e Veridiana Martins.

Por fim, aos funcionários do IGc, que sempre muito solícitos contribuíram imensamente a esta caminhada que aqui apresento uma parte.

Não posso deixar de mencionar que esta dissertação foi inteiramente construída durante a Pandemia de Covid-19, momento em que o contexto político nacional, especialmente de pesquisa, políticas públicas e de saúde foram arrasadores contabilizando inúmeras perdas humanas.

“Fomos, durante muito tempo, embalados com a história de que somos a humanidade. Enquanto isso – enquanto seu lobo não vem – fomos nos alienando desse organismo de que somos parte, a Terra, e passamos a pensar que ele é uma coisa e nós, outra: a Terra e a humanidade. Eu não percebo onde tem alguma coisa que não seja natureza. Tudo é natureza. O cosmos é natureza. Tudo que eu consigo pensar é natureza.”

Ailton Krenak

RESUMO

Balaguer, L. P., 2022, Avaliação da geodiversidade como base para estratégias de Geoconservação em áreas protegidas: estudo aplicado ao Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Caraguatatuba (SP) [Dissertação de Mestrado], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 125 p.

O município de Caraguatatuba, no litoral norte do estado de São Paulo, é parte de um mosaico de áreas costeiras que compõem uma das principais áreas protegidas do estado: o Parque Estadual da Serra do Mar. Embora expressiva, a área protegida tem sido cada vez mais suprimida pela urbanização e industrialização, representando forte ameaça à geodiversidade. A geodiversidade da região está associada aos registros geológicos de amalgamação, evolução e fragmentação do supercontinente Gondwana, passando pela abertura do Oceano Atlântico Sul, formação da Serra do Mar e episódios de variação do nível do mar. Os elementos e processos da geodiversidade associados a estes eventos apresentam benefícios à sociedade e encontram-se ameaçados por fatores naturais e antrópicos. Por este motivo, a caracterização e a avaliação integrada da geodiversidade, que contribua para estratégias de conservação da natureza na unidade de conservação, deve levá-los em consideração. Este trabalho objetiva caracterizar a geodiversidade do município com foco na área protegida, além de definir e avaliar os serviços ecossistêmicos providos pela geodiversidade e quantificar suas perdas. A metodologia empregada baseou-se em cinco etapas: (i) confecção de mapeamento geoambiental em escala de detalhe, (ii) definição das Variáveis Essenciais da Geodiversidade (EGVs), (iii) identificação dos serviços ecossistêmicos providos pela geodiversidade, (iv) confecção de mapas de uso e ocupação do solo de 1990 e 2020 e (v) avaliação quantitativa dos impactos à geodiversidade e aos serviços ecossistêmicos. O mapa geoambiental resultou em 11 unidades que abrangem os processos denudacionais das rochas cristalinas da Serra do Mar e os processos agradacionais das planícies costeiras, fluvial e fluviomarinha, que estão associadas a potencialidades e limitações de uso na gestão territorial. Dentre as EGVs foram definidas as categorias geologia, recursos minerais, geomorfologia, pedologia, hidrologia e depósitos inconsolidados. A identificação dos serviços ecossistêmicos providos pela geodiversidade indicou 76 serviços distribuídos nas funções de regulação, suporte, provisão, cultural e conhecimento. Destes, os mais ameaçados pela urbanização e pela ausência de vegetação são, respectivamente: suporte (50,9%), regulação (47,7%), cultural (41,9%), conhecimento (34,9%) e provisão (31,2%). Os resultados obtidos por meio da caracterização integrada da geodiversidade abrangem dados que permitem uma avaliação consistente e com base nos vetores de impacto à porção abiótica. Espera-se que os dados resultantes possam servir como ferramenta para políticas públicas.

Palavras-chaves: áreas protegidas, geodiversidade, geoconservação, mapeamento geoambiental, serviços ecossistêmicos

ABSTRACT

Balaguer, L. P., 2022, Geodiversity assessment as bases strategies of Geoconservation in protected areas: study applied to the Serra do Mar State Park – Núcleo Caraguatatuba (SP) [Master's Dissertation], São Paulo, Institute of Geociences, University of Sao Paulo, 125 p.

The Caraguatatuba county, on the northern coast of the state of São Paulo, is part of a mosaic of coastal areas that make up one of the main protected areas in the state: the Serra do Mar State Park. Although expressive, the protected area has been increasingly suppressed by urbanization and industrialization, representing a strong threat to geodiversity. The geodiversity of the region is associated with the geological records of amalgamation, evolution and fragmentation of the supercontinent Gondwana, including the opening of the South Atlantic Ocean, the formation of Serra do Mar Mountain Range and episodes of sea level variation. The elements and processes of geodiversity associated with these events present benefits to society and are threatened by natural and anthropic factors. For this reason, the characterization and integrated assessment of geodiversity, which contributes to nature conservation strategies in the conservation unit, must take them into account. This work aims to characterize the municipality's geodiversity with a focus on the protected area, in addition to defining and assessment the ecosystem services provided by geodiversity and quantifying their losses. The methodology used was based on five steps: (i) geoenvironmental mapping in a detailed scale, (ii) definition of the Essential Geodiversity Variables (EGVs), (iii) identification of ecosystem services provided by geodiversity, (iv) land use and occupation maps for 1990 and 2020 and (v) quantitative assessment of impacts on geodiversity and ecosystem services. The geoenvironmental map resulted in 11 units that cover the denudational processes of the Serra do Mar crystalline rocks and the flatten processes of the coastal, fluvial and fluviomarine plains, which are associated with potential and limitations of use in territorial management. Among the EGVs, the categories geology, mineral resources, geomorphology, pedology, hydrology and unconsolidated deposits were defined. The identification of ecosystem services provided by geodiversity indicated 76 services distributed in the functions of regulating, supporting, provisioning, cultural and knowledge. Of these, the most harmed by urbanization and the absence of vegetation are, respectively: supporting (50.9%), regulating (47.7%), cultural (41.9%), knowledge (34.9%) and provisioning (31.2%). The results obtained through the integrated characterization of geodiversity include data that allow a consistent assessment and based on the vectors of impacts to the abiotic portion. It is hoped that the resulting data can serve as a tool for public policy.

Keywords: ecosystem services, geodiversity, geoconservation, geoenvironmental mapping

RESUMEN

Balaguer, L.P, 2022, Evaluación de la geodiversidad como base para las estrategias de geoconservación en áreas protegidas: un estudio aplicado al Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Caraguatatuba (SP) [Tesis de Maestría], São Paulo, Instituto de Geociencias, Universidad de São Paulo, 125 p.

El municipio de Caraguatatuba, ubicado en el litoral norte del estado de São Paulo, es parte de un mosaico de zonas costeras que constituyen una de las principales áreas protegidas del estado: el Parque Estadual da Serra do Mar. Aunque expresivo, el área protegida ha sido cada vez más reprimida por la urbanización y la industrialización, lo que representa una fuerte amenaza para la geodiversidad. La geodiversidad de la región está asociada a los registros geológicos de fusión, evolución y fragmentación del supercontinente Gondwana, incluyendo la apertura del Océano Atlántico Sur, la formación de la Serra do Mar y episodios de variación del nivel del mar. Los elementos de geodiversidad asociados a estos eventos presentan beneficios para la sociedad y están amenazados por factores naturales y antrópicos. Por ello, una caracterización y evaluación integrada de la geodiversidad, que contribuya a las estrategias de conservación de la naturaleza en la unidad de conservación, debe tenerlos en cuenta. Este trabajo tiene como objetivo caracterizar la geodiversidad del municipio con enfoque en el área protegida, además de definir y evaluar los servicios ecosistémicos que brinda la geodiversidad y cuantificar sus pérdidas. La metodología utilizada se basó en cinco pasos: (i) mapeo geoambiental a escala detallada, (ii) definición de las Variables Esenciales de Geodiversidad (EGV), (iii) identificación de los servicios ecosistémicos proporcionados por la geodiversidad, (iv) confección de mapas de uso y ocupación del suelo del 1990 y 2020 y (v) evaluación cuantitativa de los impactos sobre la geodiversidad y los servicios ecosistémicos. El mapa geoambiental resultó en 11 unidades que abarcan los procesos de denudación de las rocas cristalinas de la Serra do Mar y los procesos de agregación de las llanuras costeras, fluviales y fluviomarinas, que están asociados a potencialidades y limitaciones de uso en la gestión territorial. Entre las EGV se definieron las categorías geología, geomorfología, pedología, hidrología y depósitos no consolidados. La identificación de los servicios ecosistémicos proporcionados por la geodiversidad indicó 76 servicios distribuidos en las funciones de regulación, soporte, provisión, cultural y conocimiento. De estos, los más amenazados por la urbanización y la ausencia de vegetación son, respectivamente: apoyo (50,9%), regulación (47,7%), cultural (41,9%), conocimiento (34,9%) y provisión (31,2%). Los resultados obtenidos a través de la caracterización integrada de la geodiversidad incluyen datos que permiten una evaluación consistente y basada en los vectores de impacto a la porción abiótica. Se espera que los datos resultantes puedan servir como herramienta de política pública.

Palabras clave: áreas protegidas; geodiversidad; geoconservación; mapeo geoambiental; servicios ecosistémicos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	4
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Gerais	5
1.2.2 Específicos	5
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	7
2.1 Área de estudo, localização e acesso	7
2.2 Contexto Geológico	8
2.3 Contexto Geomorfológico	11
2.4 Parque Estadual da Serra do Mar	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1 Referencial Teórico	16
3.2 Levantamento Cartográfico	16
3.3 Mapeamento Geoambiental	17
3.4 Definição das Variáveis Essenciais da Geodiversidade (EGVs)	22
3.5 Mapas de Uso e Ocupação	22
3.6 Serviços Ecosistêmicos da Geodiversidade	23
3.6.1 Identificação dos serviços ecossistêmicos providos pela geodiversidade	23
3.6.2 Avaliação dos impactos aos serviços ecossistêmicos providos pela geodiversidade	24
3.7 Checagem de campo	26
3.8 Integração dos Dados	26
4. AVALIAÇÃO COMBINADA DA GEODIVERSIDADE COMO FERRAMENTA DE GESTÃO TERRITORIAL: APLICAÇÃO AO LITORAL SUDESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL	29
4.1 Introduction	31
4.2 Study area	33
4.3 Material and methods	34
4.3.1 Geoenvironmental map	34
4.3.2 Definition of the Essential Geodiversity Variables (EGVs)	35
4.3.3 Land Use and Occupation Maps	35
4.4 Results	37
4.4.1 Geoenvironmental map	37
4.4.2 Essential Geodiversity Variables (EGVs)	40
4.4.3 Use and occupation maps	45

4.5 Discussion	47
4.5.1 Geodiversity characterization.....	47
4.5.2 Land use and anthropogenic impacts	52
4.6 Conclusions	56
5. ATÉ QUE PONTO OS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS PROVIDOS PELA GEODIVERSIDADE SÃO AFETADOS POR IMPACTOS ANTRÓPICOS? UM ESTUDO QUANTITATIVO EM CARAGUATATUBA, LITORAL SUDESTE DO BRASIL.....	65
5.1 Introduction	67
5.2 Study area	68
5.3 Methodology.....	69
5.4 Ecosystem services provided by geodiversity	73
5.4.1 Regulating services	76
5.4.2 Supporting services.....	77
5.4.3 Provisioning services	79
5.4.4 Cultural services	80
5.4.5 Knowledge services.....	81
5.5 Assessment of the losses in es provided by geodiversity	82
5.6 Discussion.....	89
5.6.1 Impacts to ES provided by geodiversity and implications of the method	89
5.6.2 Implications to geoconservation in protected areas	94
5.7 Final remarks.....	96
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	105
6.1 Sobre a avaliação da geodiversidade	105
6.2 Perspectivas para áreas protegidas.....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do município de Caraguatatuba (SP). Elaborado pela autora.	7
Figura 2 – Contexto dos cinturões orogênicos que compõem a Província Mantiqueira com destaque para o cinturão Ribeira e o extremo sul do cinturão de Brasília. (1) Cobertura Fanerozoica, (2-4) Unidades cinturão Ribeira, (3) Terreno Apiaí, (4) Terrenos relacionados ao arco e fora de borda, (5) Unidades tectônicas do cinturão Brasília, (6) Grupo Bambuí, (7) Embasamento exposto dos crátons São Francisco (CSF) e Luiz Alves (LA), terrenos tectonoestratigráficos sensu Howell (1989). Assim, a Faixa Ribeira subdivide-se em quatro terrenos, nomeadamente, o Ocidental, Paraíba do Sul-Embu, Oriental e Cabo Frio. A zona externa do cinturão, que é contínuo ao cinturão Araçuaí corresponde ao terreno Ocidental. Modificado e extraído de Heilbron et al. (2017).	8
Figura 3 – Contexto geológico regional do município de Caraguatatuba (SP). Fonte: Perrotta et al. (2005).....	9
Figura 4 – Depósitos marinhos pleistocênicos e holocênicos de Caraguatatuba (SP). Extraído de Souza (1992) e adaptado por ela.....	10
Figura 5 – Estágios evolutivos propostos por Suguio e Martin (1978) para a formação da planície costeira de Caraguatatuba, mostrando as transgressões marinhas Cananéia e Santos. Extraído de Suguio e Martin (1978).	11
Figura 6 – Parque Estadual da Serra do Mar com destaque para o núcleo Caraguatatuba no município homônimo. A área protegida tem caráter regional e se distribui por diferentes municípios paulistas em dez núcleos administrativos, como visto na imagem no canto superior esquerdo do mapa. Elaborado pela autora.	13
Figura 7 – Fluxograma das etapas de trabalho realizadas. Setas com dois lados evidenciam correlação e simultaneidade entre as etapas de trabalho.	15
Figura 8 – Sombreado obtido por meio do MDT do município de Caraguatatuba. Sombreado com configuração estabelecida de (A) azimute: 315 e altitude: 45° e (B) azimute: 45 e altitude: 45°, mantendo o fato $Z = 1$ em ambas. Elaborado pela autora.	18
Figura 9 – Mapa de declividade elaborado pela autora com base no MDT obtido pela CRPM (2017). Elaborado pela autora.	19
Figura 10 – Mapa hipsométrico de Caraguatatuba. Elaborado pela autora.....	20
Figura 11 – Mosaico de ortofotos para o município de Caraguatatuba, cedido pelo IGC (2011).	21

Figura 12 – Mapa de unidades geoambientais com pontos de campo realizados. Elaborado pela autora.....	26
Figura 13 – (A) Pedreira de granito à beira da rodovia translitorânea, (B) Erosão costeira na Praia Massaguaçu e contenção com estrutura rígida já degradada, (C) Plantação de hortaliça em planície fluvial, (D) Vista da planície fluviomarina desocupada e com pasto, (E) Passivo ambiental na planície fluviomarina ocasionada pela impermeabilização do solo a partir da duplicação do contorno da Tamoios na Bacia do Rio Juqueriquerê, (F) Embarcações e suporte de avifauna no Rio Juqueriquerê. Fotos da autora.	108
Figura 14 – (G) Ao fundo depósito de tálus em formato triangular, (H) Captação de água do Rio Guaxinduba pelos moradores, (I) Mirante natural denominado Mirante dos Tropeiros, (J) Rio Pardo, afluente do Rio Camburu, (K) Perfil de solo do domínio geoambiental Corpos máficos e ultramáficos e (L) Vista do Mirante dos Tropeiros para a vegetação de Mata Atlântica, em particular Floresta ombrófila densa montana (São Paulo, 2008). Fotos da autora.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Compilação de dados e mapas temáticos utilizados para o levantamento cartográfico	16
Tabela 2 - Classes de uso e ocupação do solo definidas para o município de Caraguatatuba (SP)	22
Tabela 3 - Classificação dos serviços ecossistêmicos providos pela geodiversidade de acordo com Gray (2013).....	24
Tabela 4 - Parâmetros para a determinação da significância das classes de uso e ocupação do solo. Extraído de Reverte et al. (2020)	25

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Potencialidades e limitações por unidade geoambiental no município de Caraguatatuba (SP)	106
---	-----

LISTA DE SIGLAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
AP	Áreas protegidas
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
EGVs	Variáveis Essenciais da Geodiversidade
IGC	Instituto Geográfico e Cartográfico do estado de São Paulo
IUCN	International Union for Conservation of Nature
IUGS	International Union Geological Science
IF	Instituto Florestal
LIGs	Locais de Interesse Geológico
NuCar	Núcleo Caraguatatuba
PESM	Parque Estadual da Serra do Mar
ProGEO	The European Association for the Conservation of the Geological Heritage
SEs	Serviços ecossistêmicos
SIGMINE	Sistema de Informação Geográfica da Mineração
SMA	Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do estado de São Paulo
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

1. INTRODUÇÃO

A conservação da natureza em âmbito internacional foi impulsionada a partir da década de 1970. No Brasil, ela foi marcada principalmente a partir dos anos 80 e 2000, devido ao movimento socioambiental e à criação do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), respectivamente (Franco et al., 2015).

De acordo com Franco et al. (2015), a conservação da natureza foi expressa ao longo da história por diferentes concepções, que culminaram na noção da necessidade de criação de áreas protegidas (AP). Neste contexto, surgiu, em 1948, a União Internacional para Conservação da Natureza (IUCN, em inglês) sob a denominação de “União Internacional para Proteção da Natureza – IUPN”, órgão internacional regulador das diretrizes de gestão em AP até o presente momento.

Embora o primeiro grande marco de APs criadas no mundo seja o Parque Nacional de Yellowstone (EUA, 1872), consolidado sobre aspectos geológicos como componentes principais, ao longo dos anos observou-se um crescente movimento conservacionista voltado à “vida selvagem”. Isto se refletiu, por exemplo, na consolidação do conceito de biodiversidade durante os anos 80 (Gray, 2004). Entretanto, mesmo com a iminência de discussões atuais de fenômenos naturais que cada vez mais se intensificam devido ações antrópicas e comprometem também a biodiversidade, a grande maioria das APs continuam a negligenciar a porção abiótica em práticas conservacionistas.

Desde a década de 1990 a porção abiótica da natureza tem sido referida como “geodiversidade”, em contrapartida à biodiversidade, e tem recebido diversas definições. Para Gray (2013), a geodiversidade é conceituada como:

“a variedade natural (diversidade) de elementos geológicos (rochas, minerais, fósseis), geomorfológicos (formas de relevo, topografia, processos físicos), solos e feições hidrológicas, incluídas suas associações, estruturas, sistemas e contribuição à paisagem” (Gray, 2013, p. 12).

Sharples (2002), ao discutir o termo e sua importância para a área da geoconservação, se refere à geodiversidade como “a metade esquecida” da conservação da natureza, que possui escalas de manifestação variadas, desde global à local. Isto denuncia a negligência desta porção, que é destacada, por exemplo, na ausência de valorização do capítulo do meio físico de planos de manejo de APs, em detrimento da biodiversidade. Isto esbarra no desbalanço em estratégias de conservação da natureza, que prejudicam planos de ação efetivos nessas áreas, não se aproveitando da geodiversidade que, inclusive, é grande atrativo turístico devido sua

importância geomorfológica. Além disso, a geodiversidade possui valores funcionais, como o de suporte para grandes florestas do mundo.

Atualmente o número de APs no mundo registram um percentual em torno de 15,4% da superfície terrestre, que abrange cerca de 20,6 milhões de km² (Franco et al., 2015). De acordo com a *World Database on Protected Areas*, a América Latina e Caribe totalizam 10.016 APs, distribuídas em áreas terrestres, marinhas e outras medidas eficazes de conservação baseadas na área (UNEP, WCMC, IUCN, 2022). Somente no Brasil, esse número é de 3.202 APs, que indica um percentual de 30,3% para área terrestre protegida e 26,8% para área marinha protegida (Mucivuna et al., 2021; UNEP, WCMC, IUCN, 2022).

Neste contexto, somado à concepção contemporânea de conservação da natureza em APs assentada na abordagem de ecossistemas e serviços ecossistêmicos, torna-se relevante a realização de estudos que contribuam para a temática. Serviços ecossistêmicos (SE) é o conceito que advém do termo utilizado por Erlich e Money (1893) ao abordar os benefícios dos ecossistemas ao ser humano. Ao longo dos anos o termo recebeu diversas definições, especialmente na década de 1990 (Constanza et al., 1997) e a partir de 2005, após o estabelecimento do “*Millennium Ecosystem Assessment*” (MEA).

Segundo Constanza et al. (2017), os SE são compreendidos como características ecológicas, funções e processos do ecossistema que beneficiam direta e indiretamente à sociedade. Os SE podem ser classificados de diferentes maneiras, como proposto em MEA (2005), *The Economics of Ecosystem of Biodiversity* (TEEB) e *Common International Classification of Ecosystem Services* – CICES (Haines-Young Potschin, 2013) e se relacionar à valoração monetária, denominada capital natural (Constanza e Daly, 1992; De Groot, 2002).

O capital natural (renovável e não renovável) e a abordagem em geral de SE podem ser entendidos sob uma perspectiva utilitarista, que vem sendo empregada em políticas públicas para pagamentos de serviços ambientais. Embora a temática seja amplamente divulgada, impera um certo descaso perante o potencial da geodiversidade na promoção e na participação no funcionamento do ecossistema, como apontado em Fox et al. (2020) e discutido por Gray (2019). Van Ree (2017) corrobora o exposto ao explicitar a pouca abrangência dos SE providos especialmente pela subsuperfície do planeta em detrimento da biodiversidade, ideia partilhada em Alahuhta et al. (2018).

A partir de 2011, começaram a surgir esforços para identificar os SE providos pela geodiversidade (Gray, 2011; Gordon e Barron, 2013; Brilha et al., 2018) culminando, inclusive, em nova classificação para estes SE (Gray, 2013; Gray, 2019). Segundo Gray (2019), os SE providos pela geodiversidade (ou serviços geossistêmicos) são bens e serviços que beneficiam

o ser humano de forma consciente ou não e podem ser divididos em cinco funções: suporte, provisão, regulação, cultural e conhecimento.

Para Gray (2021) e Chakraborty e Gray (2020), a geodiversidade é um conceito multifacetado, que esbarra em diferentes aplicações no planejamento e na gestão territorial, dentre elas nas AP. Considerar a geodiversidade neste contexto significa aprimorar as estratégias de conservação da natureza e romper a barreira existente entre os tomadores de decisões e as ciências da Terra, que hoje se apresentam como desafio para políticas públicas eficientes.

Neste sentido, destaca-se o reconhecimento da geodiversidade como parte integrante da natureza por meio de ações realizadas pela IUCN, principalmente a partir de resoluções (4.040/2008, 048/2012) e das Diretrizes para a Geoconservação em Áreas Protegidas e Conservadas (Crofts et al., 2015; Crofts et al., 2020; Crofts et al., 2021). Recentemente, a Organização das Nações Unidas para Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO, em inglês), que regula ações do patrimônio geológico em nível mundial, adotou, no dia 22 de novembro de 2021, em Conferência Bienal da UNESCO, em Paris, o Dia Internacional da Geodiversidade como o dia 6 de outubro (<https://en.unesco.org/news/unesco-adopts-international-geodiversity-day>).

Diante do exposto, compreender a geodiversidade e suas ameaças a partir de uma avaliação adequada é um instrumento para alavancar a geoconservação e suas práticas, especialmente em APs, onde o tópico é pouco disseminado apesar de suas inúmeras aplicações (Gordon et al., 2021). Além disso, a abordagem se apresenta em um contexto de extrema relevância para os ecossistemas costeiros, uma vez que as áreas costeiras se comportam de maneira complexa ao entrelaçar processos terrestres, oceânicos e atmosféricos frente às mudanças climáticas (IPCC, 2021).

Com vistas a contribuir para as estratégias de conservação da natureza e de geoconservação em APs, o presente trabalho aborda a caracterização da geodiversidade do município de Caraguatatuba, com foco no Parque Estadual da Serra do Mar (PESM). A abordagem é feita por meio de uma avaliação integrada, baseada na combinação de mapeamento geoambiental a partir da metodologia do Serviço Geológico do Brasil (Ramos et al., 2018), identificação e avaliação dos SE providos pela geodiversidade, bem como suas ameaças e impactos.

A dissertação está organizada em seis capítulos, sendo dois deles de resultados apresentados em formato de artigos. O capítulo 4, intitulado “Avaliação combinada da geodiversidade como ferramenta de gestão territorial: aplicação ao litoral sudeste do estado de

São Paulo”, apresenta dados para a avaliação integrada da geodiversidade, enquanto o capítulo 5 “Até que ponto os serviços ecossistêmicos providos pela geodiversidade são afetados por impactos antrópicos? Um estudo quantitativo em Caraguatatuba, litoral sudeste do Brasil” apresenta os resultados da identificação dos SE providos pela geodiversidade e suas principais ameaças antrópicas. As considerações finais abordam a integração dos dados obtidos nos capítulos 4 e 5, abrangendo suas contribuições à geoconservação em áreas protegidas dentro do panorama atual.

1.1 Justificativa

O município de Caraguatatuba, inserido no contexto do litoral paulista, possui relevante papel no cenário econômico e turístico regional. Um conjunto de fatores naturais, como a configuração do meio físico e da biodiversidade, propiciaram o desenvolvimento urbano e o aproveitamento monetário de recursos naturais em diversos setores econômicos e turísticos na região.

Especialmente por conter uma das mais extensas planícies costeiras do litoral no norte do estado de São Paulo (Souza, 2012), somado a fatores estruturais, o município tem apresentado um intenso processo de urbanização. Este processo remonta à época das construções da rodovia Rio-Santos e da estrada Tamoios nas décadas de 1960 e 70, que tiveram influência direta na facilitação do acesso à área e no escoamento de produtos do litoral ao interior do estado (Rosemback, 2013).

Nas décadas seguintes, o crescimento urbano passou a ser atribuído especialmente à criação do Porto de São Sebastião e, mais recentemente, à especulação imobiliária devido ao crescente interesse turístico e o denominado turismo de massa (Gigliotti e Santos, 2013). Neste contexto, a região se caracteriza por ser uma zona vulnerável ao vetor urbano devido à sua interface oceano-continente e à complexa dinâmica hidrogeológica.

Ainda que a região possua uma das mais importantes áreas protegidas do estado, o Parque Estadual da Serra do Mar (PESM), que recobre grande porcentagem da área do município, existe ameaça aos seus benefícios para o ecossistema frente ao mais recente Zoneamento Econômico Ecológico (ZEE, 2017). De acordo com a definição das zonas e suas respectivas atividades econômicas, a atual zona de amortecimento do PESM está sob ameaça, principalmente pela flexibilização quanto às atividades industriais.

Diante da complexidade das interações econômicas, ambientais e sociais do município, evidencia-se a urgência de se integrar a geodiversidade à discussão da conservação da natureza e à geoconservação com foco aos SEs. Uma vez que a geodiversidade é negligenciada no

contexto de identificação dos SEs, faz-se relevante a sua avaliação, essencialmente em locais que interagem com áreas protegidas, as quais têm papel central na manutenção desses bens e serviços.

Além disso, a testagem de metodologias para identificação dos SEs providos pela geodiversidade e seus impactos torna-se ferramenta para o aprimoramento e a divulgação da abordagem. Por meio destes estudos é possível construir estratégias de conservação da natureza integradas e abrangentes para o alcance do desenvolvimento sustentável em Caraguatatuba e em outros locais. Neste sentido, a geoconservação tem contribuições significativas para o quadro da agenda global de 2030 dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODSs), como apontado em ProGEO (2020) e Stewart e Gill (2017). O PESM torna-se uma área piloto especial, uma vez que o Sistema Nacional de Unidades de Conservação, SNUC (lei nº 9.985/2000) prevê a facilitação do lugar para aplicação e validação de metodologias de conservação da natureza.

1.2 Objetivos

1.2.1 Gerais

O presente trabalho propõe a caracterização da geodiversidade do município de Caraguatatuba (SP), com destaque ao Parque Estadual da Serra do Mar (Núcleo Caraguatatuba) e zona de amortecimento, com vistas à identificação dos serviços ecossistêmicos prestados pela geodiversidade e aos impactos nestes serviços causados pelas perdas da geodiversidade.

1.2.2 Específicos

Os objetivos específicos consistem em:

- i. Realizar o mapeamento geoambiental qualitativo do município de Caraguatatuba
- ii. Definir e caracterizar os domínios geoambientais
- iii. Identificar os serviços ecossistêmicos prestados pela geodiversidade local a partir das Variáveis Essenciais da Geodiversidade (EGVs)
- iv. Avaliar quantitativamente os impactos aos SEs providos pela geodiversidade no município
- v. Discutir estes temas no contexto do Parque Estadual da Serra do Mar, Núcleo Caraguatatuba

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

No presente capítulo são apresentados os aspectos administrativos e do meio físico relativos à geologia e à geomorfologia da área de estudo.

2.1 Área de estudo, localização e acesso

A área de estudo é o município de Caraguatatuba (Fig. 1), com destaque para o núcleo homônimo do PESH, litoral norte do estado de São Paulo.

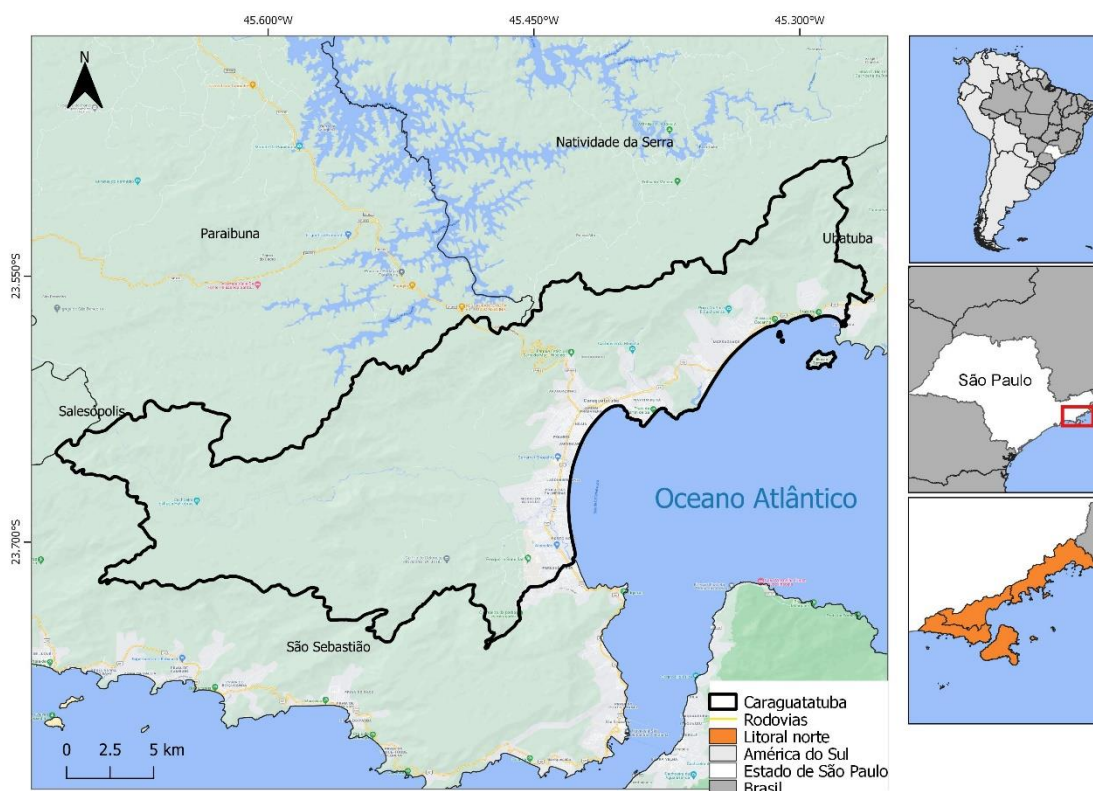


Figura 1 – Localização do município de Caraguatatuba (SP). Elaborado pela autora.

O município de Caraguatatuba dista 188 km da capital do estado e faz divisa com os municípios de São Sebastião, Paraibuna, Natividade da Serra e Ubatuba. O acesso a área se dá pelas rodovias dos Tamoios (SP-099), Rio Santos (BR-101), Mogi-Bertioga (SP-98) e Oswaldo Cruz (SP-125).

Como um dos dez núcleos do Parque Estadual da Serra do Mar, o núcleo Caraguatatuba é uma Unidade de Conservação de Proteção Integral, de acordo como o Sistema Nacional de Unidades de Conservação – SNUC (Lei nº9.985/2000), gerida pela Fundação Florestal. O núcleo ocupa cerca de 75,3% do município de Caraguatatuba e abrange também porções dos municípios de Paraibuna e Natividade da Serra (São Paulo, 2019; Mazzucato, 2017).

Acompanhando a área de proteção integral tem-se a zona de amortecimento, incluída também na área de estudo.

2.2 Contexto Geológico

O contexto geológico e geomorfológico no qual o município de Caraguatatuba (SP) se insere relaciona-se aos eventos de amalgamação, fragmentação e separação do paleocontinente Gondwana Ocidental, à abertura do Oceano Atlântico Sul e formação da Serra do Mar e às elevações do nível do mar. Esses eventos são datados desde o Neoproterozoico até o presente.

A área insere-se no contexto da Província Estrutural Mantiqueira, que registra processos acrescionários, de colisão continente-continente e de colapso extensional que representam o período do Neoproterozoico ao Cambriano (840 a 450 Ma) (Heilbron et al., 2004). A província, que se estende por cerca de 3000 km na direção NE-SW, da porção sul a sudeste do país, é composta por um sistema de orógenos diacrônicos (Almeida e Carneiro, 1998; Heilbron et al., 2004; Hasui et al., 2012). A área de estudo situa-se no Orógeno Ribeira (Fig.2), localizado a sul da zona de Cisalhamento de Cubatão (Perrotta et al., 2005).

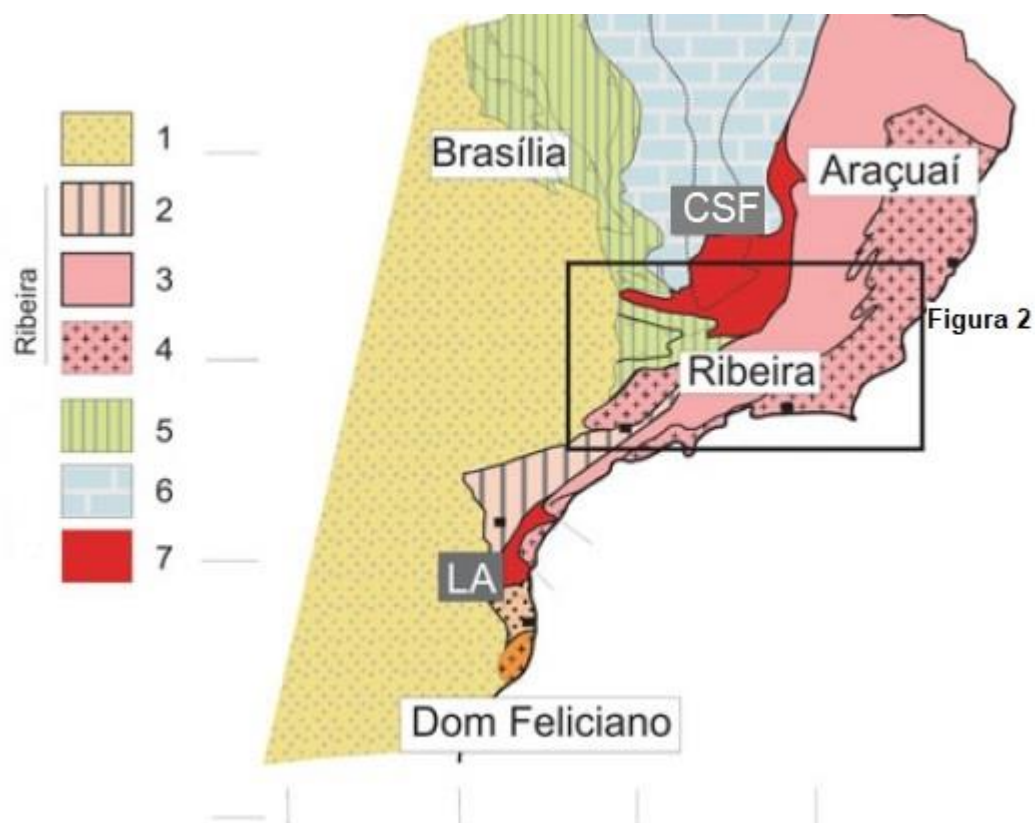


Figura 2 – Contexto dos cinturões orogênicos que compõem a Província Mantiqueira com destaque para o cinturão Ribeira e o extremo sul do cinturão de Brasília. (1) Cobertura Fanerozoica, (2-4) Unidades cinturão Ribeira, (3) Terreno Apiaí, (4) Terrenos relacionados ao arco e fora de borda, (5) Unidades tectônicas do cinturão Brasília, (6) Grupo Bambuí, (7) Embasamento exposto dos crátons São Francisco (CSF) e Luiz Alves (LA), terrenos tectonoestratigráficos sensu Howell (1989). Assim, a Faixa Ribeira subdivide-se em quatro terrenos, nomeadamente, o Ocidental, Paraíba do Sul-Embu, Oriental e Cabo Frio. A zona externa do cinturão,

que é contínuo ao cinturão Araçuaí corresponde ao terreno Ocidental. Modificado e extraído de Heilbron et al. (2017).

O orógeno ou cinturão Ribeira Central vincula-se ao evento de amalgamação do Supercontinente Gondwana Ocidental (650 a 510 Ma), que se deu a partir da colisão entre os crátons São Francisco e Congo Ocidental, em conjunto com microplacas e terrenos, associado ao ciclo Brasileiro/Pan-Africano (Heilbron et al., 2004).

Regionalmente, o orógeno Ribeira é composto pelo terreno Serra do Mar e Coberturas Sedimentares Cenozoicas (Heilbron e Machado, 2003; Perrotta et al., 2015). No Terreno Serra do Mar se insere o domínio Costeiro, constituído pelo complexo homônimo que, segundo Meira (2014), caracteriza-se pela heterogeneidade de rochas migmatíticas, metaígneas de protólito básico a intermediário e rochas metabásicas e metaintermediárias (Bairro do Marisco), sendo rochas metamorfisadas desde as fácies granulito até anfíbolito (arqueanas), representativas do embasamento cristalino da região.

A tectônica da região é marcadamente transpressiva, com falhas transcorrentes do tipo dextral com direção NE-SW, com destaque para as zonas de cisalhamento Camburu e Caraguatatuba (Mora et al., 2013; Perrotta et al., 2015) (Fig.3).

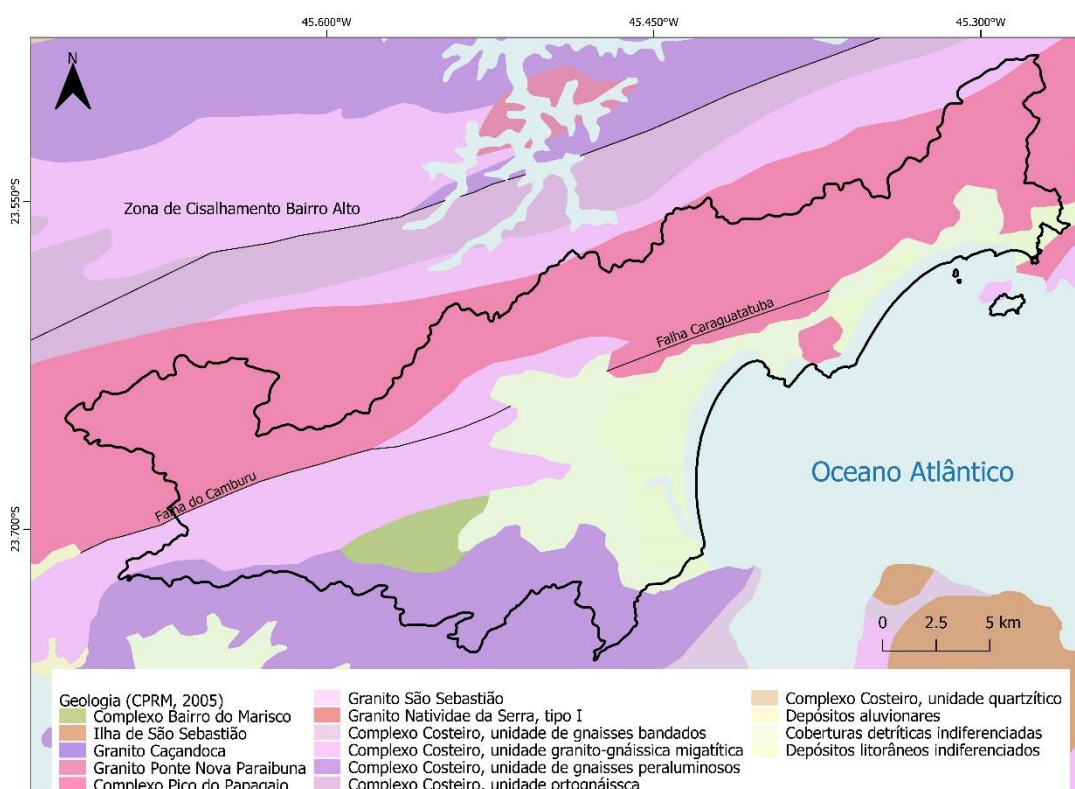


Figura 3 – Contexto geológico regional do município de Caraguatatuba (SP). Fonte: Perrotta et al. (2005).

No mesozoico ocorre a fragmentação do Paleocontinente Gondwana Ocidental, resultando na abertura do Oceano Atlântico Sul e no desenvolvimento da borda Atlântica, onde ocorreu vulcanismo fissural basáltico e toleítico. Este evento é registrado por meio dos diversos diques encontrados ao longo da costa sudeste do Brasil, desde Santa Catarina às praias do litoral norte do estado de São Paulo (Mafra, 2000; Coutinho, 2008).

No Quaternário são registrados ao menos quatro períodos de glaciação, os quais foram responsáveis pela configuração atual de depósitos de praias arenosas na planície costeira de Caraguatatuba (Souza, 1997). Na planície são descritos cordões litorâneos provenientes do pico transgressivo do nível do mar (NM), denominado de Transgressão Cananea, datado em torno de 120 mil A.P. (anos antes do presente) (Souza, 1992). Seguidos a este máximo do NM, ocorrem depósitos de cristas praias, interpretados e associados ao segundo evento de transgressão, denominado de Transgressão Santos, datado a partir de 5000 B.P. Esta transgressão, diferente da primeira, datada do Pleistoceno, limita o período do Holoceno com registros de duas gerações de cristas litorâneas, uma mais antiga e espessa e outra mais recente, menos espaçada e, portanto, com sedimentação mais rápida (Fig. 4) (Suguio e Martin, 1978; Souza, 1992).

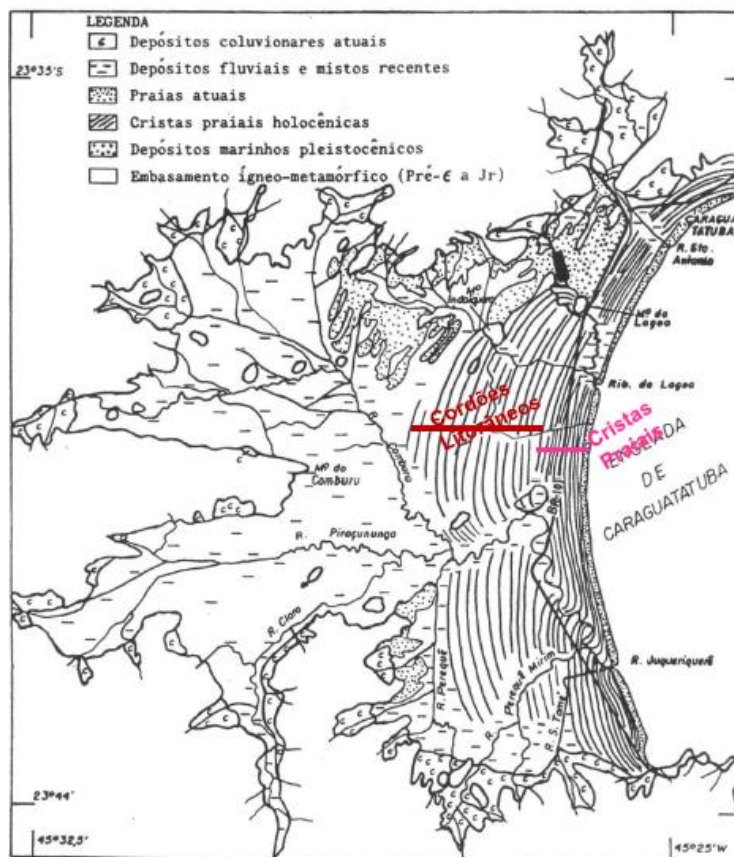


Figura 4 – Depósitos marinhos pleistocênicos e holocênicos de Caraguatatuba (SP). Extraído de Souza (1992) e adaptado por ela.

A figura 5 mostra o esquema elaborado por Suguio e Martin (1978) sobre os diferentes estágios das transgressões marinhas até o estágio atual, que são responsáveis pela configuração da planície costeira de Caraguatatuba.

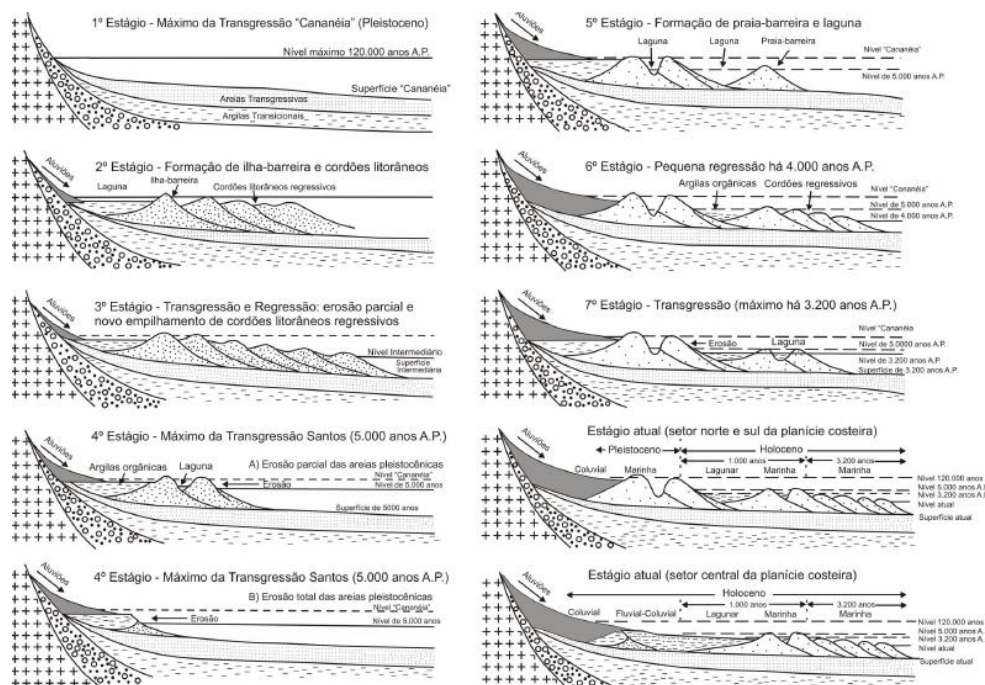


Figura 5 – Estágios evolutivos propostos por Suguio e Martin (1978) para a formação da planície costeira de Caraguatatuba, mostrando as transgressões marinhas Cananéia e Santos. Extraído de Suguio e Martin (1978).

2.3 Contexto Geomorfológico

Almeida (1967) situa o contexto geomorfológico do município de Caraguatatuba na Província Costeira, composta pelas zonas Serra do Mar e baixada litorânea.

Segundo Almeida e Carneiro (1988), a Serra do Mar é uma feição orográfica com extensão de cerca de 1000 km, que abrange desde Santa Catarina até o Rio de Janeiro. No estado de São Paulo, a estrutura apresenta altitudes que variam de 800 a 1200 metros. De acordo com os autores, a origem desta feição está associada ao conjunto dos processos tectônicos de movimentações verticais – vinculados à distensão decorrente da reativação mesozoica e à formação do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989), no Cenozoico – e posterior recuo erosivo diferencial, no Cretáceo Superior. Os morros testemunhos e as paleoilhas, distribuídos ao longo da planície costeira, confirmam esta última hipótese.

Essa feição geomorfológica apresenta falhas na direção NE-SW como elementos estruturais predominantes que condicionam aspectos físicos da região. Tais aspectos se referem ao condicionamento da drenagem, que tem nascentes na Serra do Mar, e o alinhamento da linha

de costa paulista. O último tem interferência nos processos da geomorfologia costeira que se debruçam sobre a baixada litorânea (Souza, 2012).

No setor norte do litoral paulista a Serra do Mar e a linha de costa são mais próximas do que no setor sul. Isto resulta em diversas proposições de classificações para o litoral paulista, apontadas em Souza (2012). No entanto, segundo a autora, as praias do setor norte se apresentam mais restritas e recortadas, sendo do tipo baías e enseadas.

Na planície costeira de Caraguatatuba foi descrita e caracterizada por Souza (1992) uma seção de depósito marinho costeiro pleistocênico, com extensão de 400 metros de afloramento contínuo e 3,5 metros de espessura máxima, que foi correlacionado à Formação Cananeia, mencionada no tópico anterior. Além disso, cordões e cristas litorâneas estão presentes, assim como terraços fluviais como o Rio do Ouro, descrito em Souza (1997).

Em março de 1967 a porção da Serra do Mar abrangida pelo município de Caraguatatuba sofreu uma série de escorregamentos e debris flow, desencadeados por episódios de intensa precipitação que atingiram níveis pluviométricos de cerca de 600,00 a 945,6 mm e culminou em um evento catastrófico (Cruz, 1974, Gramani, 2001).

2.4. Parque Estadual da Serra do Mar

No Brasil as áreas protegidas estão asseguradas pelo Sistema de Unidades de Conservação (SNUC, lei nº9.985/2000), instaurado em 2000. De acordo com o SNUC, as unidades de conservação são divididas em dois grupos: de uso sustentável e de proteção integral.

O grupo de uso sustentável permite o uso direto dos recursos naturais de maneira sustentável, enquanto o grupo de proteção integral se volta apenas ao uso indireto dos recursos naturais, tais como o desenvolvimento de atividades de pesquisas científicas, educação (incluída a ambiental), recreação e turismo ecológico (São Paulo, 2021).

Dentro do grupo de Proteção Integral existem cinco categorias, das quais o Parque Estadual é uma delas. Nesta categoria, o objetivo principal se vale para a preservação dos ecossistemas naturais de relevância ecológica e cênica por meio dos artifícios de uso indireto, como previsto no parágrafo anterior.

O Parque Estadual da Serra do Mar (PESM) foi criado em 1977 (Decreto nº10.251), com o objetivo de assegurar a conservação da flora (remanescentes de Mata Atlântica, principalmente), fauna, beleza cênica e garantir usos educativos, científicos e recreativos. À época, o parque contava com 23 municípios e 8 núcleos administrativos que, juntos, somavam cerca de 315.390 hectares de área (São Paulo, 2008). Hoje, o parque cobre uma extensa área

que vai desde municípios do litoral sul paulista, passando pelo Vale do Ribeira, até o Rio de Janeiro, sendo considerado a maior área de proteção integral do litoral (São Paulo, 2021). Atualmente o parque é organizado em dez núcleos administrativos, dentre os quais o núcleo Caraguatatuba, foco do presente estudo.

O núcleo Caraguatatuba (Fig. 6) foi inaugurado também no ano de 1977, embora sua área de abrangência já tenha sido considerada reserva natural desde 1956 e Parque Estadual de Caraguatatuba desde 1962. Hoje a área possui cerca de 35.947 hectares e abrange os municípios de Paraibuna e Natividade da Serra. Além disso, o parque e suas estratégias de gestão contribuem para a garantia e a promoção de serviços ecossistêmicos, tais como regulação do clima e da qualidade da água, proteção de morros, encostas e solos, turismo, polinização, bem-estar e manutenção de importantes bacias hidrográficas do litoral norte que abastecem Caraguatatuba e as demais regiões (São Paulo, 2021).

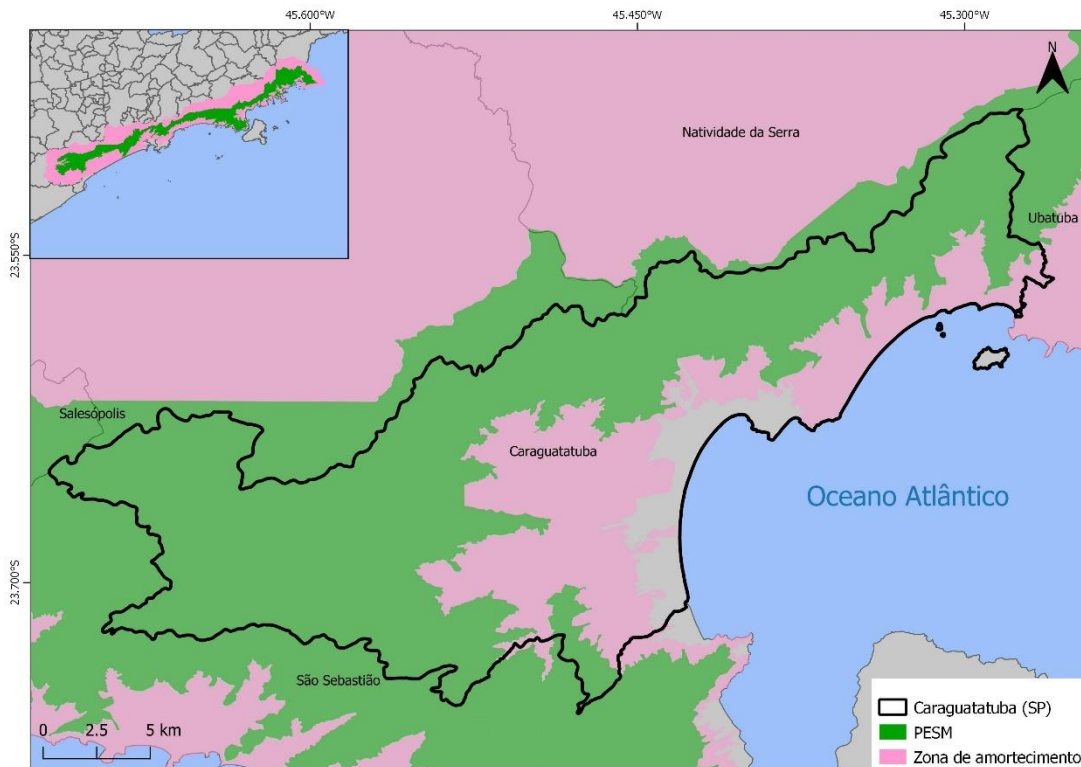


Figura 6 – Parque Estadual da Serra do Mar com destaque para o núcleo Caraguatatuba no município homônimo. A área protegida tem caráter regional e se distribui por diferentes municípios paulistas em dez núcleos administrativos, como visto na imagem no canto superior esquerdo do mapa. Elaborado pela autora.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas para a realização do trabalho estão apresentadas na figura 7 e os dados e procedimentos metodológicos utilizados são descritos nas oito etapas seguintes.

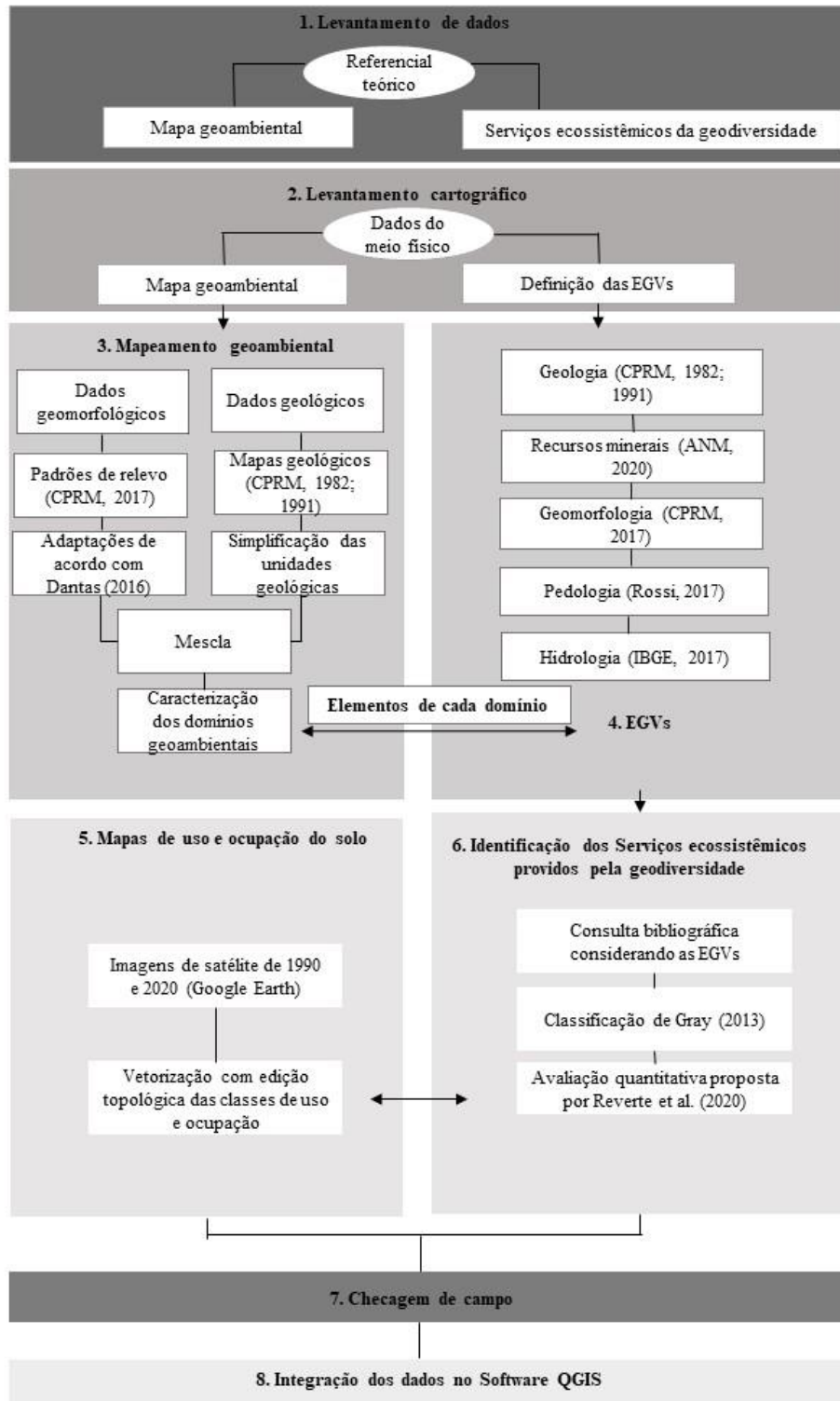


Figura 7 – Fluxograma das etapas de trabalho realizadas. Setas com dois lados evidenciam correlação e simultaneidade entre as etapas de trabalho.

3.1 Referencial Teórico

O levantamento bibliográfico consistiu na etapa inicial do trabalho, na qual foram pesquisados temas relativos ao mapeamento geoambiental, de acordo com a CRPM, aos Serviços Ecossistêmicos da Geodiversidade e às Variáveis Essenciais da Geodiversidade (EGVs). As pesquisas foram realizadas em bases de dados de publicações on-line, tais como Scopus, Web of Science e Google Scholar, contando com artigos científicos publicados em revistas nacionais e internacionais, além da consulta a teses e dissertações na área.

3.2 Levantamento Cartográfico

Nesta etapa foram manipulados dados cartográficos digitais, arquivos raster e vetoriais de diversas fontes em Sistema de Informação Geográfica (SIG), a fim de se alcançar dois objetivos: (i) fornecer bases para a definição das unidades e domínios do mapa geoambiental e (ii) identificar as EGVs. As bases do levantamento cartográfico estão detalhadas na tabela 1.

Tabela 1 - Compilação de dados e mapas temáticos utilizados para o levantamento cartográfico

Título	Escala	Referência bibliográfica	Ano	Instituição	Tipo de arquivo
Dados aerofotogramétricos do estado de São Paulo: IGC – Ortofotos Leste de SP	Resolução de 1 metro	IGC (2011)	2011	IGC – SP	GeoTIFF
MDT	5 X 5	Cartas de suscetibilidade a movimentos de massa – Caraguatatuba 1: 50 000	2017	CPRM	Raster
Padrões de relevo – Caraguatatuba	1: 25 000	Cartas de suscetibilidade a movimentos de massa – Caraguatatuba 1: 50 000	2017	CPRM	SHP
Mapa Geológico do Estado de São Paulo	1: 750 000	Perrotta et al. (2005)	2005	CPRM	SHP
Folhas de mapas geológicos (Caraguatatuba, Natividade da Serra e Pico do Papagaio)	1: 50 000	CPRM (1982, 1991)	1982 e 1991	CPRM	Folhas
Mapa Pedológico do Estado de São Paulo	1: 750 000	Rossi et al. (2017)	2017	IF	SHP
Zoneamento Ecológico Econômico do Município de Caraguatatuba	1: 50 000	SMA (2017)	2017	SMA – SP	SHP

Limites do PESM	Litoral norte do estado de São Paulo	Silva et al. (2009)	2009	CPRM	SHP
Limites Zona de amortecimento	Litoral norte do estado de São Paulo	Cedido pelo PESM - NuCar		PESM - NuCar	KMZ
Recursos minerais	-	SIGMINE (2020)	2020	ANM	SHP

3.3 Mapeamento Geoambiental

O mapa geoambiental foi elaborado em escala 1:25 000 com base na proposta metodológica do Serviço Geológico do Brasil (Ramos et al., 2018), considerando a mescla de feições dos mapas geomorfológico e geológico com predomínio do último para a base do mapa final.

Os dados geomorfológicos foram obtidos em formato shapefile do projeto suscetibilidade do município de Caraguatatuba (CPRM, 2017), em escala 1: 25 000, e adaptados de acordo com o catálogo Padrões de relevo no território brasileiro (Dantas, 2016), que considera variáveis de declividade e amplitude do relevo.

A adaptação do arquivo shapefile de padrões de relevo teve por objetivo detalhar as feições a partir da inserção de elementos inexistentes ou separação de elementos até então unidos. Neste sentido, foram inseridas feições como depósitos tecnogênicos (mineração), planícies fluviomarinhas, rampas de alúvio-colúvio, rampas de colúvio-depósitos de tálus, e separadas as planícies fluviais e marinhas. Para esta adaptação foram necessárias a produção e utilização dos seguintes dados morfométricos como produtos auxiliares:

- (i) Sombreado: extraído a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT) de resolução de 5x5 metros do projeto suscetibilidade do município de Caraguatatuba (CPRM, 2017). A configuração estabelecida foi de azimute: 315 e altitude: 45° e azimute: 45 e altitude: 45°, mantendo o fato $Z = 1$ em ambas. Tal configuração permite analisar os padrões de relevo sob diferentes ângulos solares (Fig. 8).

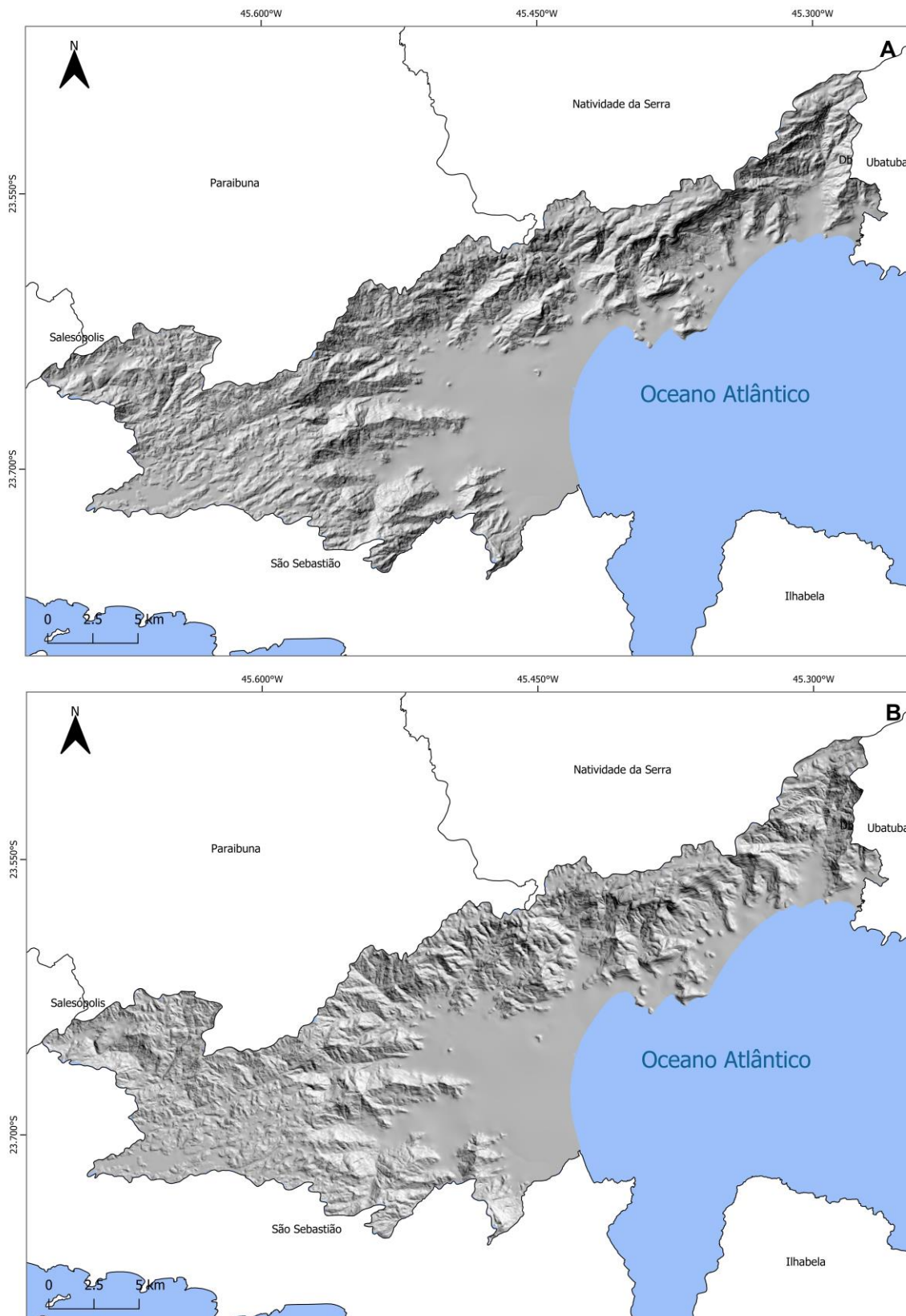


Figura 8 – Sombreado obtido por meio do MDT do município de Caraguatatuba. Sombreado com configuração estabelecida de (A) azimute: 315 e altitude: 45° e (B) azimute: 45 e altitude: 45°, mantendo o fato Z = 1 em ambas. Elaborado pela autora.

- (ii) Declividade: extraída a partir do comando de análise de raster com a camada de entrada sendo o MDT e expressa em graus, reclassificada pelo comando `r.reclass` do GRASS a partir de intervalo de 9 classes (IPT, 2014) (Fig. 9).

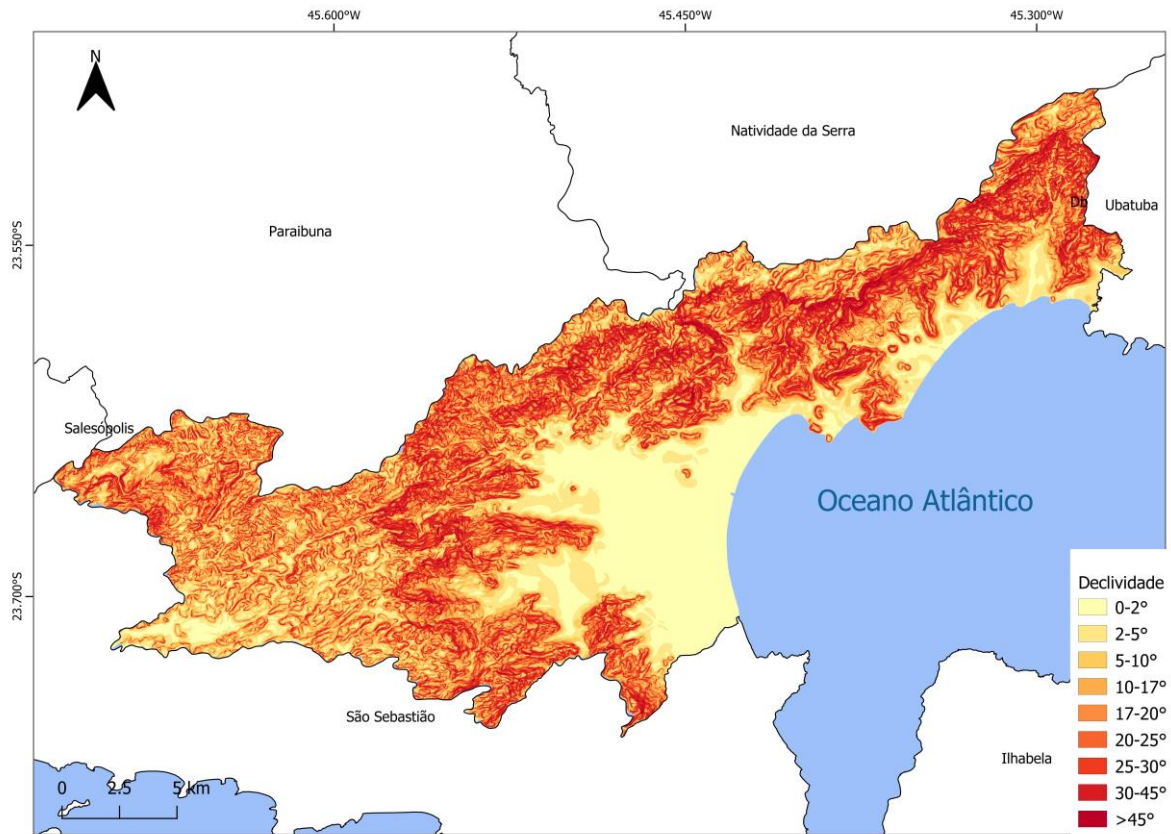


Figura 9 – Mapa de declividade elaborado pela autora com base no MDT obtido pela CRPM (2017). Elaborado pela autora.

- (iii) Hipsometria: obtida a partir da aplicação de banda simples falsa cor ao MDT (Fig. 10).

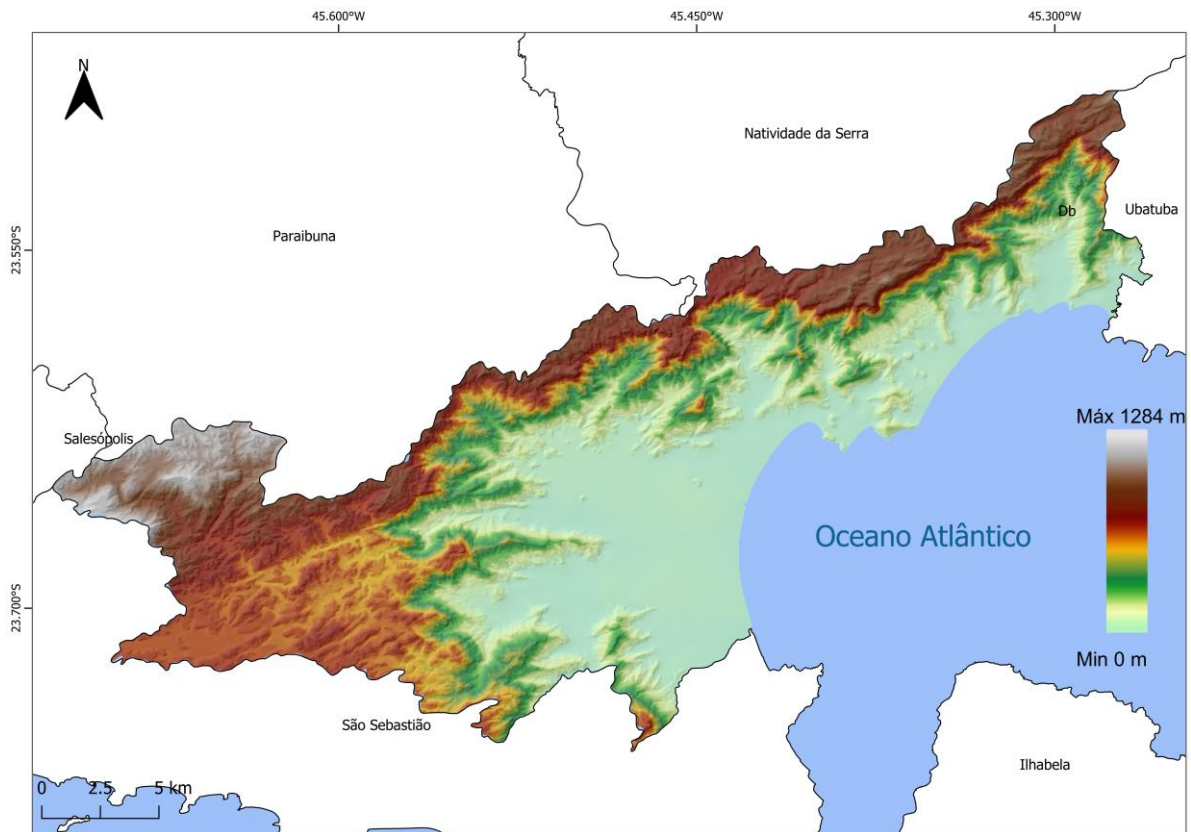


Figura 10 – Mapa hipsométrico de Caraguatatuba. Elaborado pela autora.

- (iv) Ortofoto com resolução de 1 metro e recortadas segundo articulação em escala 1:25.000, obtida pelo Instituto Cartográfico (IGc, 2011) (Fig. 11).



Figura 11 – Mosaico de ortofotos para o município de Caraguatatuba, cedido pelo IGC (2011).

Os dados geológicos foram obtidos a partir da vetorização com edição topológica de três folhas geológicas (Caraguatatuba, Pico do Papagaio e Natividade da Serra) em escala 1: 50 000 da CPRM (1982, 1991). Devido à grande compartimentação e diversidade de unidades geológicas encontradas a partir da junção das folhas, foram realizadas simplificações de acordo com dados de composição e estruturas semelhantes, disponíveis nos respectivos relatórios das folhas geológicas. A título de detalhamento, foram também acrescentados no mapa geológico os depósitos tecnogênicos (mineração) e as planícies fluvio marinhas identificadas a partir da adaptação do mapa geomorfológico.

O mapa geoambiental resultante manteve as feições base do mapa geológico e incluiu feições relevantes do mapa de padrões de relevo (depósitos tecnogênicos, planícies fluviais e planícies fluvio marinhas). Optou-se por não utilizar as feições de rampas de alúvio-colúvio e de rampas de colúvio-depósitos de tálus identificadas a partir da adaptação do mapa geomorfológico devido à sua extensão extremamente contínua e desconexa com a realidade. Por isso, utilizou-se, para representar esta feição, os depósitos de colúvio representados no mapa geológico da CPRM (1982, 1991).

3.4 Definição das Variáveis Essenciais da Geodiversidade (EGVs)



De acordo com Schrodtt et al. (2019), as EGVs são componentes do meio físico que contribuem para a identificação de características e processos complexos da superfície e de subsuperfície. Os autores definem quatro classes de EGVs relacionadas à geologia, geomorfologia, pedologia e hidrologia, sendo as EGVs representativas dessas classes. As EGVs foram propostas com base nas estratégias de variáveis já aplicadas no ramo da biodiversidade e revelam um instrumento de relevância para os tomadores de decisões e gestores de políticas públicas e ambientais.

Na área de estudo, além dos dados geológicos e geomorfológicos já mencionados nas etapas anteriores, a pedologia foi obtida em formato shapefile, em escala 1:750 000, e reclassificada em subclasses de solos (Rossi, 2017). A hidrologia, caracterizada pelos tipos de aquíferos e rios, foi obtida a partir do mapa interativo do Instituto Brasileiro Geografia e Estatística em formato shapefile e escala 1:250 000 (IBGE, 2017). Os recursos minerais foram extraídos do Sistema de Informação Geográfica (SIGMINE) da Agência Nacional de Mineração (ANM).

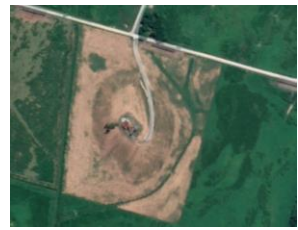
3.5 Mapas de Uso e Ocupação

Os mapas de uso e ocupação do solo foram elaborados em escala 1:25 000 por meio de vetorização com edição topológica a partir de imagens de satélite dos anos de 1990 e 2020 obtidas no Google Earth. As classes de uso e ocupação do solo definidas estão descritas na tabela 2.

Tabela 2 - Classes de uso e ocupação do solo definidas para o município de Caraguatatuba (SP)

Classes	Descrição	Imagens
Vegetação nativa	Mata Atlântica	
Praia	Depósitos de areia acumulados pela ação das ondas na interface continente-oceano	

Solo exposto	Solo exposto por atividades antrópicas
Água	Águas superficiais e corpos hídricos naturais
Área urbana	Área residencial, inserida residências secundárias, e comercial
Áreas de extração mineral	Extração mineral na planície costeira e na encosta da Serra do Mar
Complexo industrial	Instalações com alto padrão de organização em áreas restritas
Agricultura, silvicultura e pastagem	Atividades humanas de cultivo, monocultura e vegetação de gramíneas



3.6 Serviços Ecosistêmicos da Geodiversidade

3.6.1 Identificação dos serviços ecosistêmicos providos pela geodiversidade

A identificação dos SE providos pela geodiversidade para o município de Caraguatatuba se deu pela consulta de referencial teórico disponível em artigos, teses, dissertações e livros, considerando as EGVs identificadas previamente. A classificação de SE utilizada foi a de Gray (2013), que considera cinco funções ecosistêmicas e vinte e cinco serviços (tabela 3).

Tabela 3 - Classificação dos serviços ecossistêmicos providos pela geodiversidade de acordo com Gray (2013)

Funções	Serviços
Regulação	R.1 Processos atmosféricos e oceânicos
	R.2 Processos terrestres
	R.3 Controle de inundações
	R.4 Regulação e qualidade da água
Suporte	S.1 Processos pedológicos
	S.2 Provisão de habitats
	S.3 Terras como plataformas para atividades humanas
	S.4 Sepultamento e estocagem
Provisão	P.1 Alimento e bebida
	P.2 Nutrientes e minerais para desenvolvimento saudável
	P.3 Combustível
	P.4 Materiais para construção
	P.5 Minerais industriais
	P.6 Produtos ornamentais
	P.7 Fósseis
Conhecimento	C.1 História da Terra
	C.2 História da pesquisa
	C.3 Monitoramento e previsão ambiental
	C.4 Geoforese
	C.5 Educação e emprego
Cultural	C.1 Qualidade ambiental
	C.2 Geoturismo e lazer
	C.3 Significados culturais, espirituais e históricos
	C.4 Inspiração artística
	C.5 Desenvolvimento social

3.6.2 Avaliação dos impactos aos serviços ecossistêmicos providos pela geodiversidade

A avaliação dos impactos aos SE fornecidos pela geodiversidade de Caraguatatuba foi feita por meio do método desenvolvido por Reverte et al. (2020). O método quantitativo pode ser compreendido em quatro principais etapas:

- (i) confecção de mapa de uso e ocupação do solo;

- (ii) definição da significância (σ) de alteração de cada classe de uso e ocupação sobre o meio físico com base em três parâmetros (tabela 4);

Tabela 4 - Parâmetros para a determinação da significância das classes de uso e ocupação do solo. Extraído de Reverte et al. (2020)

Parâmetro	Descrição	Classificação		
		Classe	Valor	Descrição
Cobertura	Tamanho da área impactada	Local	1	Mudanças locais e limitadas
		Regional	2	Mudanças generalizadas
Magnitude	Intensidade das mudanças	Baixa	1	Mudanças pequenas
		Média	2	Mudanças significativas
		Alta	3	Mudanças muito significativas
Fator de reversibilidade	Capacidade de restauração	Totalmente reversível	1	As condições iniciais são totalmente restauradas
		Parcialmente reversível	2	As mudanças podem ser interrompidas evitando maiores danos
		Irreversível	3	Não é possível interromper as mudanças ou restaurar as condições iniciais

Fonte: Reverte (2020, p. 34)

- (iii) realização de correlações entre as classes de uso e ocupação do solo com os SE providos pela geodiversidade de acordo com os seguintes valores:
1- Não possui relação relevante, 2- Relação indireta e 3- Relação direta;
- (iv) determinação dos valores de significância relativa (σ_{Rel}) e significância por grupo (σ_{Grupo}).

A significância relativa se refere à perda dos SE, enquanto a significância por grupo corresponde à perda destes serviços por cada função ecossistêmica (regulação, suporte, provisão, cultural e conhecimento). Esta determinação, apresentada em porcentagem, envolve a correlação de três matrizes (passos ii, iii e iv), que é determinada pelas duas equações seguintes:

$$\sigma_{Rel} = \frac{S(Se)}{n \max\{\sigma\} \max\{b_{i,j}\}}$$

Onde:

n é a quantidade de categorias de uso e ocupação do solo

$\max\{\sigma\}$ é o valor máximo de significância que pode ser obtido

$\max\{b_{i,j}\}$ é o valor máximo que pode ser obtido na matrix b, de correlação das categorias de uso e ocupação do solo com os serviços ecossistêmicos

$$\sigma_{Group} = \frac{\text{Soma das colunas da matrix } C}{n^{\circ} \text{ de servi\c{c}os por fun\c{c}\~{a}o ecossist\~{e}mica}$$

3.7 Checagem de campo

Foram realizados cinco dias de atividades de campo entre os dias 7, 8, 9, 14 e 15 de outubro de 2021 com o intuito de detalhar e readequar o mapa geoambiental confeccionado.

Em campo foram visitados 50 pontos distribuídos pelo município (Fig. 12) ao longo de trilha no PESM, estradas e perfis de rios. Utilizou-se o aplicativo Avenza Maps, que permitiu andar sobre o mapa geológico 1: 50 000 (CPRM, 1982, 1991), coletar coordenadas geográficas, realizar registros fotográficos georreferenciados e descrever os aspectos físicos do meio (geologia, formações superficiais) e sua relação com o entorno, bem como a dinâmica da população com a geodiversidade (distribuição das casas, atividades econômicas e uso da geodiversidade).

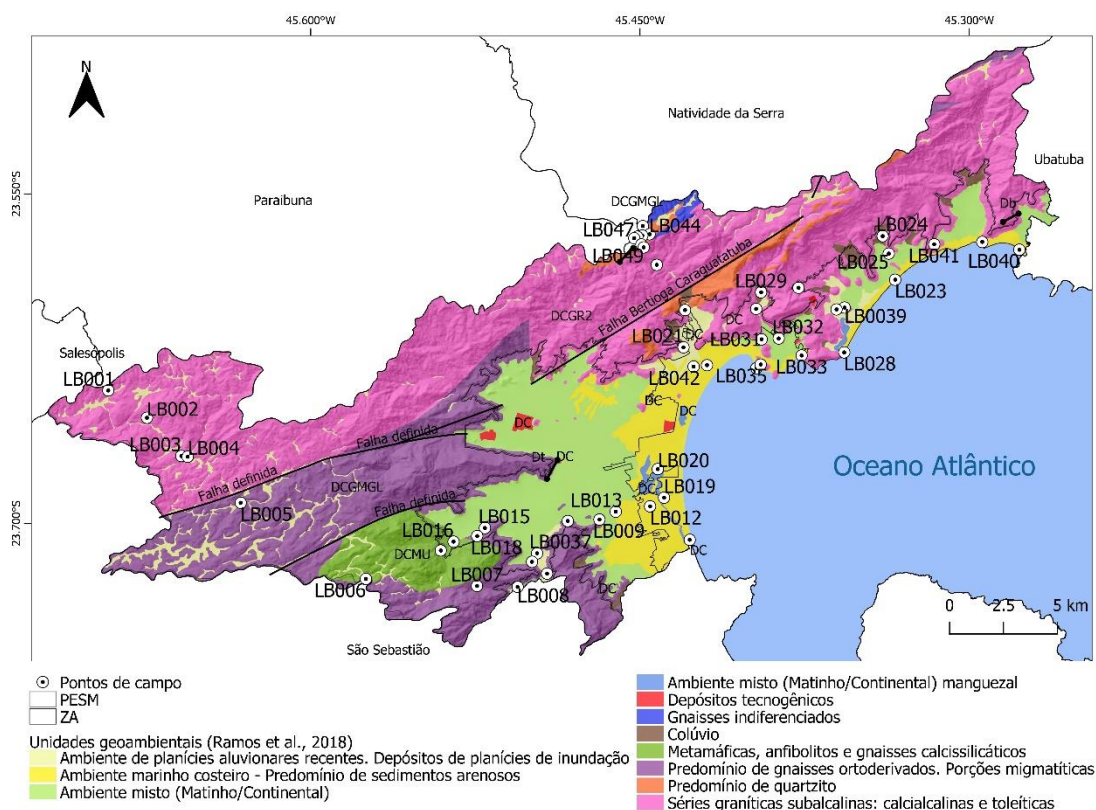


Figura 12 – Mapa de unidades geoambientais com pontos de campo realizados. Elaborado pela autora.

3.8 Integração dos Dados

A integração dos dados referente aos mapas se deu em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), no software QGIS 3.10.5, sob reprojeção dos arquivos shapefile

e raster em sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator), zona 23 S e Datum WGS 1984. Para a confecção de todos os mapas realizados foram utilizadas as ferramentas de compositor.

4. AVALIAÇÃO COMBINADA DA GEODIVERSIDADE COMO FERRAMENTA DE GESTÃO TERRITORIAL: APLICAÇÃO AO LITORAL SUDESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

Artigo em processo de revisão na revista Geoheritage

Resumo

A geodiversidade, conceituada como a variedade de materiais e processos geológicos, geomorfológicos, pedológicos e hidrológicos, compõe, com a biodiversidade, a diversidade natural. Embora reconhecida pela International Union for Conservation of Nature (IUCN), no Brasil poucas são as cidades que inserem de maneira efetiva o tópico da geodiversidade nas estratégias de conservação e gestão. O trabalho objetiva apresentar os dados que subsidiarão a avaliação qualitativa da geodiversidade do Núcleo Caraguatatuba do Parque Estadual da Serra do Mar e área de amortecimento com intuito de proporcionar a inserção da geodiversidade no contexto de áreas protegidas brasileiras. A metodologia empregada baseou-se em três principais etapas: (i) definição das unidades geoambientais em escala 1:25.000; (ii) identificação de Variáveis Essenciais da Geodiversidade (EGVs) e (iii) confecção e comparação de mapas de uso e ocupação do solo das últimas três décadas (1990-2020). Os resultados obtidos por meio do mapeamento geoambiental definiram onze unidades geoambientais distribuídas em cinco domínios, que contribuíram em conjunto com as EGVs para a avaliação da geodiversidade local, ao passo que os mapas de uso e ocupação demonstraram ameaças e impactos antrópicos às EGVs, vinculadas ao crescimento urbano, turismo e às atividades de mineração. Os dados se mostraram relevantes e apontaram ser ferramentas úteis para estratégias de identificação e inserção integrada da geodiversidade no contexto do ordenamento territorial.

Palavras-chave: Geodiversidade, Gestão territorial, Mapa geoambiental, Variáveis Essenciais da Geodiversidade

COMBINED ASSESSMENT OF GEODIVERSITY AS TOOL TO TERRITORIAL MANAGEMENT: APPLICATION TO SOUTHEASTERN COAST OF STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL

Laura Pereira Balaguer^a, Maria da Glória Motta Garcia^a, Lígia Maria de Almeida Leite Ribeiro^b

^a Institute of Geosciences, University of São Paulo, Department of Mineralogy and Geotectonics, Rua do Lago, 562, 05508-030, São Paulo, Brazil. E-mails: laura.balaguer@usp.br; mgmgarcia@usp.br

^b Geological Survey of Brazil (CPRM), Department of Geology, Rua Costa, 55, 01304-010, Consolação, São Paulo, Brazil. E-mail: ligia.ribeiro@cprm.gov.br

Abstract

Geodiversity, conceptualized as the variety of geological, geomorphological, pedological and hydrological material and process, composes, with biodiversity, the natural diversity. Although recognized by the International Union for Conservation of Nature (IUCN), in Brazil, there are few cities that effectively insert the topic of geodiversity in conservation and management strategies. The work aims to present geodiversity assessment integrated data at Caraguatatuba municipality that future will support the ecosystem services assessment of the Caraguatatuba Nucleus of the Serra do Mar State Park and buffer zone to promote the insertion of geodiversity in Brazilian protected areas. The methodology used was based on three stages: (i) definition of geoenvironmental units on a scale of 1:25,000; (ii) identification of Essential Geodiversity Variables (EGVs) and (iii) establishment of land use categories based on the comparison of maps for the last three decades (1990-2020). The results obtained by the geoenvironmental mapping defined eleven geoenvironmental units distributed in five domains, which contributed together with the EGVs for the assessment of the local geodiversity, while the use and occupation maps demonstrated anthropic threats and impacts to the EGVs, linked urban growth, tourism and mining activities. The data proved to be relevant and pointed out useful tools for strategies for the identification and integrated insertion of geodiversity in the spatial planning.

Keywords: Essential geodiversity variables, Geodiversity, Geoenvironmental map, Territorial management

4.1 Introduction

Geodiversity is the variety of geological, geomorphological, pedological and hydrological materials and processes. The term was coined in the 1990s and recognized after the Convention on Biological Diversity during the Earth Summit in Rio de Janeiro in 1992 as the abiotic equivalent of biodiversity (Gray, 2013). Since then, several definitions have been proposed for the term (Nieto, 2001; Sharples, 2002; Kozłowski, 2004; Serrano and Ruiz-Flaño, 2007; among others).

Geodiversity has been recognized as an integral part of nature by the International Union for the Conservation of Nature (IUCN), which have been gradually integrating the concept in its agenda by means of several actions, such as resolutions 4,040/2008 and 048/2012, creation of the Group of Specialists in Geological Heritage (2014), chapters dedicated to the theme in the Management Manual of Protected Areas (2015) and guidelines for geoconservation in protected and conserved areas (Crofts et al. 2020). Also noteworthy are the Geodiversity Action Plans and the geodiversity charters, developed mainly in the United Kingdom (Dunlop et al. 2018). Such actions include the abiotic portion as a natural element of independent relevance and associated with biodiversity, which provides direct and indirect goods and services to society (Gray 2018; Brilha et al. 2018).

Despite recognition in the last twenty years, geodiversity is still neglected in conservation strategies at international and national levels in spheres of territorial ordering and protected areas. Forte (2014) reinforces the importance to broadly consider the geodiversity at different levels of territorial management, which, according to Gray (2004), implies complexity in terms of assessment, since geodiversity manifests at different scales.

The research of suitable methods to evaluate geodiversity has increased, especially in the last decade and triggered the development of quantitative, qualitative and mixed approaches for different purposes (Zowlinski et al. 2018). Quantitative approaches are based on geodiversity indexes, grid systems and centroid analysis, which correlate algorithms in Geographic Information System (GIS) environments (Serrano e Ruiz-Flaño 2007; Pereira et al. 2013; Santos et al. 2017; Araújo e Pereira 2018; Forte et al. 2018; Betárd e Peulvast 2019; Fernández et al. 2020). Qualitative approaches are dedicated to the nominal or ordinal data of geodiversity variables and their spatial distribution, such as geodiversity values (Gray, 2004), geodiversity ecosystem services (Gray 2011; Gray 2012; Hjort et al. 2015; Brilha et al. 2018; Alahuhta et al. 2018; Garcia 2019; Fox et al. 2020; Silva e Nascimento 2020) and Essential Geodiversity Variables (EGVs) (Schrodt et al. 2019).

Several methods of quantitative assessment of geodiversity have been proposed and applied, which provides indirect and rapid evaluations. However, Soms (2017) and Crisp et al. (2020) relate some gaps, such as incoherence of the concept with the applied method, absence of standardization criteria or even the consolidation of a specific method. According to the authors, these gaps may hinder their use in proposals for land management. On the other hand, qualitative approaches, such as the EGVs, can contribute as subsidies to themes related to natural resource management, global changes and conservation, since they describe complex characteristics and processes of both surface and subsurface using specific classes that encompass the elements of geodiversity (Schrodt et al. 2019). This method may be used as relevant tool for managers and decision makers, being important to corroborate potentials and limitations of the use and occupation of the territory, as well as its threats in face of anthropic interests.

One of the practical applications of the study of geodiversity is land management. The Geological Survey of Brazil (CPRM) has explored this theme through the realization of geoenvironmental maps at national, state and regional scales as a subsidy to social, economic and environmental segments for the proper use of the territory (Silva et al. 2006; Peixoto et al. 2010). Geoenvironmental maps are broadly used since the 1980s, based on homogeneous units defined over physical aspects of the territory. The Geoenvironmental map data is linked to the EGVs, as the attribute table brings data from the physical environment such as geology, geomorphology, pedology and hydrography, resulting an integrated product.

In the state of São Paulo, which is the most industrialized territory in Brazil, nature conservation is a complex and challenging task. The main issues range from highly damaging agribusiness activities in the countryside to uncontrolled occupation of natural areas. In this sense, the municipality of Caraguatatuba, in the Southeastern coast, constitutes an example of a highly touristic territory with an intense urbanization process that threatens both bio and geodiversity. Contrastingly, a significant portion of its territory is inserted in the Serra do Mar State Park (SMSP), one of the most important protected areas of the state. The municipality was chosen as a pilot area for an integrated assessment of geodiversity considering anthropic pressures associated with the absence of an adequate planning for nature conservation, committed with the supply of goods and services provided by geodiversity. Therefore, is a strategy area to understand and assess geodiversity to support future identification of abiotic ecosystem services.

On the basis on these facts, this study carries out a combined assessment of geodiversity based on geoenvironmental mapping, identification of EGVs, and use and occupation maps,

integrated into a GIS environment to support future identification of ESs provided by geodiversity. With these data, we aim to answer the following questions: Which geoenvironmental units and EGVs can be identified in the area? What changes in land use occurred in the municipality over the past thirty years and how can these affect the existing protected area? How can these parameters be used to assess geodiversity?

4.2 Study area

The municipality of Caraguatatuba is located on the Southeastern coast of the state of São Paulo (Fig. 1) and covers an area of 484.947 km² (IBGE 2020). About 10% of its area is included in one of the ten sections of the Serra do Mar State Park (SMSP), the biggest protected area of the state and managed by the State Forestry Foundation (São Paulo 2019). It is a traditional tourism destination and a central route to the north coast, with an intense urbanization process.

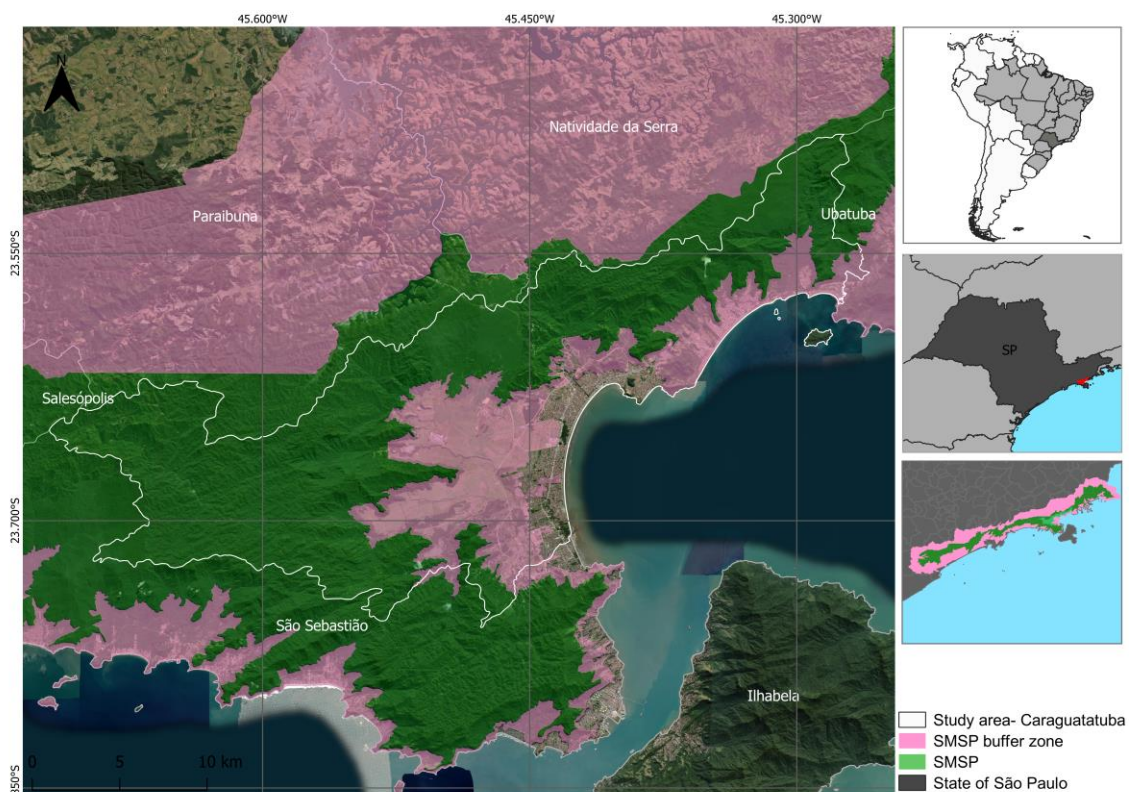


Figure 1 – Location of study area in Caraguatatuba, Southeastern coast of the state of São Paulo – with emphasis to protected areas

Caraguatatuba is located in the Ribeira Orogen (Almeida and Carneiro 1998; Heilbron et al. 2004; Hasui et al. 2012), one of the orogens that compound the Mantiqueira Structural Province (Almeida et al. 1982), a tectonic unit that extends for 3000 km in the NE-SW direction

along the southern to southeastern Brazilian coastal area. Its development is associated with the amalgamation of the Western Gondwana Supercontinent (650 to 510 Ma), known as the Brasiliano/ Pan-African cycle (Heilbron et al., 2004). In the Late Cretaceous (~ 130 Ma), the reactivation of the Brazilian Platform (Almeida 1969) was followed by breakup of this supercontinent and intense tholeiitic magmatism (Almeida et al. 1996; Garda and Schorscher 1996; Coutinho 2008), which culminated with the opening of the South Atlantic Ocean (Mohriak et al. 2008). All these processes, as well as variations of sea level, controlled the current physical configuration of the region, including the geomorphological units, such as the coastal lowlands and the Serra do Mar Mountain range (Almeida 1964), developed as a result of vertical movements in the Cenozoic (Almeida and Carneiro 1988).

4.3 Material and methods

The methodological procedures followed three steps and were integrated into a Geographic Information System (GIS) environment using the Quantum GIS Software (version 3.10.5):

4.3.1 Geoenvironmental map

The geoenvironmental map was mainly based on geomorphological and geological data at a 1:25.000 scale from the Geological Survey of Brazil (Ramos et al. 2018). Other information related to physical aspects (pedology, hydrology and mineral resources) were also used to compose the attribute table and the area described in the EGVs. The procedures for the elaboration of the geoenvironmental map are the following:

- (i) The geomorphological data was obtained in shapefile format from the susceptibility project, 1:25,000 scale (CPRM 2017). Then, adaptations were made to the file in order to insert lacking relief patterns features, such as: technogenic deposits, terraces and river plains, fluvio-marine plains, alluvium-colluvium ramps and colluvium ramps and talus deposits. These adaptations were carried out according to the catalog of relief patterns for the Brazilian territory (Dantas 2016), which considers slope variable criteria and relief amplitude. Auxiliary products also used comprise orthophoto with 1-meter resolution (IGc 2011); 5x5-meters Digital Terrain Model with shaded relief in the 315/45 and 45/45 directions; declivity map reclassified into 9 classes in degrees and hypsometric map, obtained and adapted from CPRM (2017).
- (ii) The geology was obtained by vectorization and topological edition of three geological charts at a scale of 1:50 000 (Caraguatatuba, Natividade da Serra and Pico Papagaio)

(CPRM 1982; 1991). The integration of these charts resulted in several abbreviations and geological units, which were simplified considering composition and similar structures criteria. In order to detail these data, the technogenic deposits (mining) and the fluviomarine plains identified from in the geomorphological map were also added to the geological map.

The resulting geoenvironmental map has as its main base the geological map, including relevant features of the geomorphological map. For the characterization of each domain and geoenvironmental unit, information related to geology, geomorphology, pedology and hydrology (underground and surface) was obtained from thematic maps, described in the next step of defining EGVs. The steps of geoenvironmental map and definition of EGVs was carried out concomitantly.

4.3.2 Definition of the Essential Geodiversity Variables (EGVs)

The geodiversity elements of the study area were classified according to the Schrodt et al. (2019) EGVs classes: geology, pedology, hydrology and geomorphology.

In addition to the geological and geomorphological data described in the previous step, the pedology was obtained from Rossi (2017) in a shapefile format, 1,750 000 map scale and was reclassified into a subclass of soils. The mineral resources data was provided by SIGMINE website, from National Mining Agency of Brazil (ANM). The underground and surface hydrological data were taken from the interactive map of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE 2017), on a 1:250,000 scale, and reclassified according with the types of aquifers (groundwater) and rivers (surface).

4.3.3 Land Use and Occupation Maps

Based on satellite images from the 1990s and 2020 obtained on Google Earth, land use and occupation maps were produced by means of vectorization with topological editing. From the 1:25,000 mapping scale, eight classes of land use and occupation were defined (Table 1).

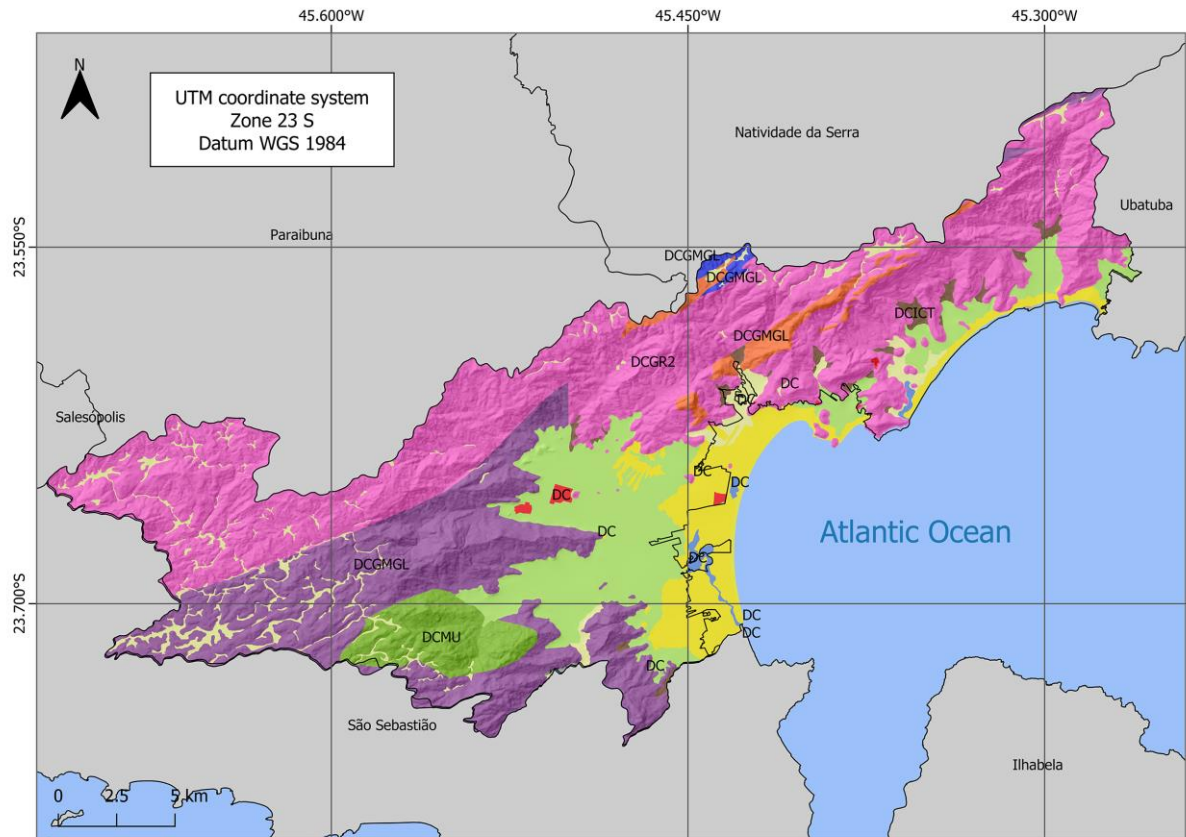
Table 1 – Classes of use and occupation described for Caraguatatuba (SP)

Class	Description	Images
Native vegetation	Atlantic forest	
Beach	Sand deposits accumulated by the action of waves at the continent-ocean interface	
Exposed soil	Exposed soil by anthropic activity	
Water	Surface waters and mostly natural bodies	
Urban area	Residential, commercial and secondary housing area	
Mineral extraction	Mineral extraction on the coastal plain or slope of Serra do Mar	
Industrial complex	Installations with organization standard in restricted areas	
Farming, forestry and pasture	Human activities due to cultivation, monoculture vegetation and low grasses	

4.4 Results

4.4.1 Geoenvironmental map

The geoenvironmental map (Fig. 2) comprises eleven geoenvironmental units distributed into five domains (Table 2).



Geoenvironmental map (adpted from Ramos et al., 2018)

Domain of unconsolidated or poorly consolidated Cenozoic sediments, deposited inaqueos or mixed environment (DC)

- Environment of recent flood plains
- Coastal marine environment
- Mixed environment (marine/continental)
- Mangrove

Technogenic deposits

Domain of Cenozoic unconsolidated sediments of colluvium and talus type (DCICT)

Unconsolidated material. Colluvium

Domain of gneisses-migmatitic granulitic complexes (DCGMGL)

Predominance of orthoderivate gneisses. May contain migmatitic portions

Undifferentiated gneisses

Predominance of quartzite

Domain of the deformed granitoid complexes (DCGR2)

Subalkaline granitic series: calciakaline and tholeiitic

Domain of mafic-ultramafic bodies (DCMU)

Metamafic, amphibolite and calcsillitic gneisses

Figure 2 – Geoenvironmental map of the municipality of Caraguatatuba

Table 2 – Description of geoenvironmental domains defined for the municipality of Caraguatatuba

Geoenvironmental domains	Geoenvironmental units	Descriptions
Domain of Cenozoic unconsolidated sediments of colluvium and talus type (DCICT)	Unconsolidated material. Colluvium. (DCICT_Co-T)	The unit has relief of alluvium-colluvium and ramps of colluvium/talus deposits and unconsolidated materials, poorly selected, from gravitational transport (Qhc).
	Technogenic deposits (DC_Tec)	The unit is associated with land altered by mining and diverse geology, such as marine and fluvial deposits, pyroxene-hornblende granites rocks (PIYc) and Pico do Papagaio granite (PScpp).
Domain of flatten units	Coastal marine environment (DCmc_Dmar)	Characterized by the relief of marine plains and terraces, geology is associated with beach deposits (Qhmp), with a predominance of sandy granulometry, and regressive coastal strands (Qhm).
	Mixed Environmental - marine/continental (DCm_Dm)	The unit is associated with the fluvial-marine plain with geology characterized by marine sands covered by fluvial deposition (Qhfm).
	Mangrove (DCm_Dm1)	Unit with a relief of mangrove fluvial-marine plane, close to the coastline, and with marine sands covered by fluvial deposition (Qhfm1).
	Environmental of recent floods plains (Dca)	Unit with relief of plains and river terraces with unconsolidated materials of gravel, sand, clay of varying thickness deposited by rivers (Qha).

Domain of denudational units	Domain of gneissic-migmatitic granulitic complexes (DCGMGL)	Predominance of ortho-derivative gneisses. May contain migmatitic portions (DCGMGL _{no})	The unit has reliefs of high hills, low hills, escarpments and hills with geology associated with gneissic-migmatitic rocks of granitic and granodioritic composition, biotite banded gneisses (PScg _g), biotite-hornblende porphyroblastic gneisses (PScg _p) and stromatolitic gneisses or banded gneisses (Acg _m) migmatized.
		Undifferentiated gneisses (DCGMGL _{ni})	Unit characterized by relief of hills and gneissic rocks of very varied textural and compositional features (PMSp _{gn}).
		Predominance of quartzite (DCGMGL _{qt})	Unit with relief pattern of escarpments and high hills with geology represented by silimanite-muscovite-greenish quartzites, sometimes greisenized (Acq).
	Domain of mafic-ultramafic bodies (DCMU)	Metamafic, amphibolite and calcisilic gneisses (DCMU _g)	Unit with relief of escarpments and low hills and metabasic rocks, metagabros, metadiorites, quartzodiorites, subordinate gnaissic monzonites and gnaissic granodiorites (PScm _b).
	Domain of the deformed granitoid complexes (DCGR2)	Subalkaline granitic series: calcalkaline and tholeiitic (DCGR2 _{alc})	The unit has relief of high hills, low hills, escarpments and hills with geology associated with Caraguatatuba granitoid rocks, such as biotite-gneiss granite with different granulations and textures, pyroxene-hornblende granites, biotite-hornblende facoidal gneiss and augen gneisses (PScp _p).

4.4.2 Essential Geodiversity Variables (EGVs)

Based on the geoenvironmental map and domains it was possible to identify six EGVs: rocks and structures, unconsolidated deposits, landforms, mineral resources soil and ground and surface water (Fig. 3).

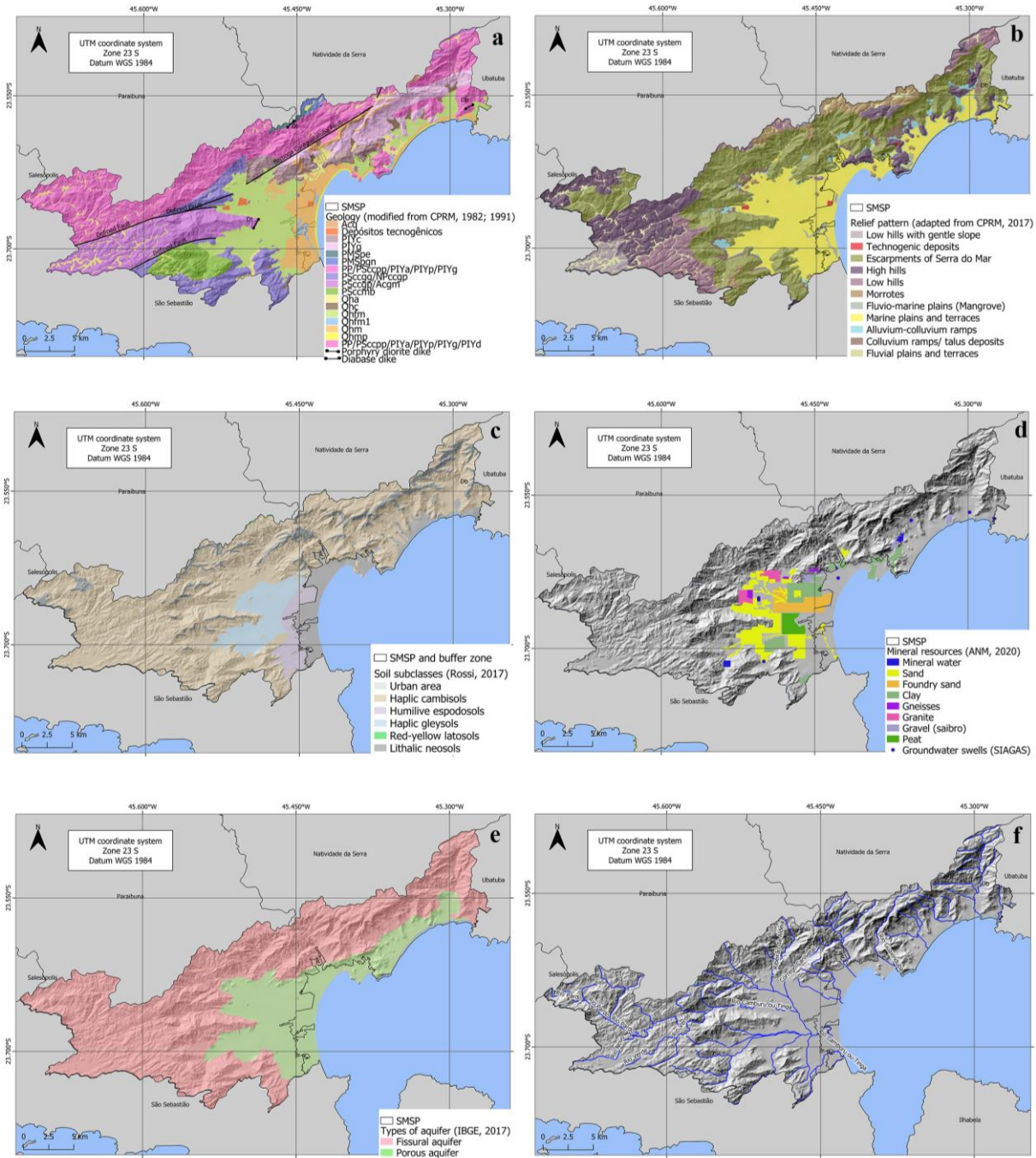


Figure 3 – Thematic maps of EGVs (a) Geology: *Qhc* - Colluvial sediments, *Qha* – Fluvial deposition, *Qhm* - Marine deposition, *Qhmp* – Beach deposition, *Qhfm* – Marine sands covered by river deposition, *Qhfm1* – Mangrove, *Acq* – Silimanite-muscovite-greenish quartzites, sometimes greysenized, *PSccpp* – Pico do Papagaio granite-gneiss unit, biotite- hornblende facial gneiss, biotite gneiss and granite, *PSccmb* – Metabasic rocks, metagabras, metadiorites, quartzodiorites, subordinately gneissic monzonites and gneissic granodiorites, *PSccgp/Acgm* – Unit of porphyroblastic gneisses, biotite and hornblende gneisses. Migmatized or banded

gneisses with of mylonitic gneisses, *PIYg* – Augen gneiss or ophthalmic migmatites, with association of gneiss granites, sometimes exhibiting granulite and metabolic remains, *PIYc* – Pyroxene-hornblende granites, hornblende-granites and biotite-granites, with gneissic structure, feldspatized and association of augen gneiss and alskitic types, *PMSpgn* – Various gnassic rocks, feldspar quartzites, calcosilicates and metabasites, undifferentiated, *PMSpe* – Mica-schists and quartzites, with the association of cacofels and gneissoids types (modified from CPRM 1982, 1992), (b) Geomorphology (adapted from CPRM 2017), (c) Pedology (Rossi 2017), (d) Mineral resources (ANM 2020) and (e) Hidrology groundwater (IBGE 2017) and (f) Hydrology surface water (IBGE, 2017).

The category of rocks and structures is characterized by gneissic-migmatitic, metabasic and granitoid rocks, from the Coastal Complex and Pico do Papagaio (CPRM 1982, 1991), and to the Bertioiga-Caraguatatuba fault and the Camburu shear zone, the latter showing ductile and brittle characteristics (Mora et al. 2013) (Fig.3A). These features represent the regional geological evolution related to the amalgamation and breakup of Gondwana.

The coastal dynamics with active geological, climatic and oceanographic processes resulted in Quaternary unconsolidated deposits (CPRM, 1982; 1991), characterized by gravel, sand and clay sediments. These deposits include sandy beaches (Fig. 4), such as Praia Porto Novo, Praia do Romance, Praia Aruan, Praia do Centro, Camaroeiro, Martim de Sá, Praia Brava, Praia do Capricórnio, Massaguaçu, Cocanha, Mococa (Fig. 4A) and Tabatinga (Fig. 4B), in addition to river deposits of different thicknesses and compositions.

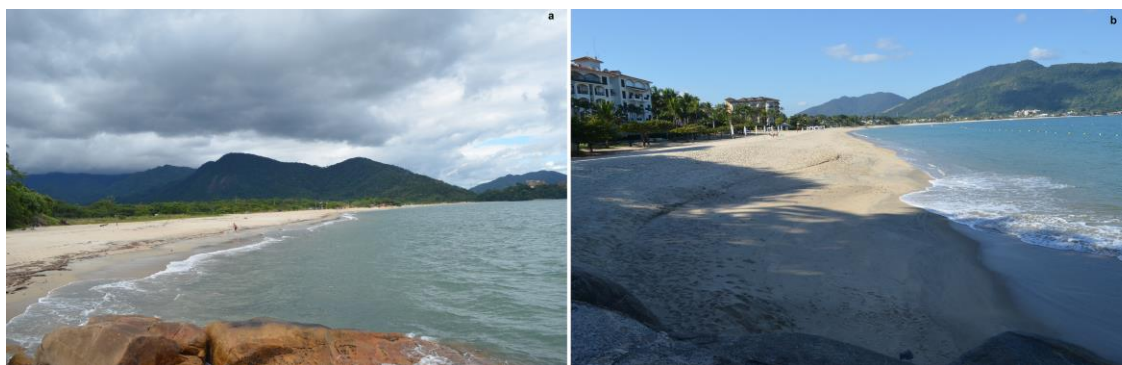


Figure 4 – Examples of sandy beaches in Caraguatatuba. (a) Mococa Beach and (b) Tabatinga Beach

Relative to the distribution of landforms, the area is included in the morpho-sculptural units of coastal and river plains and the Atlantic plateau of Ross and Moroz (1996). These units comprise marine and river terraces, related to both Pleistocene and Holocene transgressive-regressive events (Souza 1992), and the escarpments of the Serra do Mar (Cruz 1974; Almeida and Carneiro 1998), represented in figure 3B according to Ross' 3rd taxon (1992).

Due to the Serra do Mar high slopes associated with rainfall patterns landslides are recurrent processes (Fig. 5) (Gramani 2001). Historical events of landslides and debris flow

occurred in 1967 in Caraguatatuba, after intense precipitation events during the summer (Cruz 1990; Dias et al. 2019). Records of these events occur in a geosite inventoried in the SMSP (Arruda et al. 2017; Garcia et al. 2019).



Figure 5 – Santo Antônio Hill, Caraguatatuba (a) Landslides in 2017 and (b) Landslide scars

The soils are founded in almost all geoenvironmental units, except in the urbanized areas. According to Rossi (2017), the study area has five soils subclasses (Fig. 3C): lithalic neosols, red-yellow latosols, Haplic cambisols, Haplic gleisols and Humilave espodosols. The soils are important because they provide the support to the Atlantic Forest, the main bioma in the region.

The mineral resources are an EGV with economic relevance for the social development of the territory. According to the ANM (2020), these resources are characterized by sands, clays, gravel, gneisses, granites, water, and peat (Fig. 3D). Reports from the same agency indicates that these mining areas are associated mainly with civil and industrial construction sectors.

The hydrology comprises groundwater (Fig. 3E) and surface water with both marine and fluvial dynamics (Fig. 3F). According to the São Paulo State Integrated Water Resources Management System (2017), the municipality of Caraguatatuba belongs to the Management Unit 3, composed by river of the following hydrographic basins: Juqueriquerê, Santo Antônio, Guaxinduba, Massaguaçu / Bacuí, Mococa and Tabatinga. The sedimentary and crystalline aquifers in the study area (Fig. 3E) are mainly used from tubular wells for domestic and industrial purposes.

The relationship between EGVs and geoenvironmental units is shown in table 3.

Table 3 – Relationship of geoenvironmental domains and EGVs for the studied area

Geoenvironmental domains	Geoenvironmental units	Classes of EGVs						Ground cover
		Geology			Geomorphology	Pedology	Hydrology	
		Unconsolidated deposits	Rocks and structures	Mineral resources				
DCICT	DCICT_Co-T	-	PScpp and PIYg		Colluvium ramps/talus deposits and alluvium-colluvium ramps	Haplic Cambisols	Fissural aquifer	Native vegetation
	DCm_Dm1	Qhm e Qha	-	Sand	Fluvial-marine plains (mangrove)	-	Porous aquifer	Urban area and water
Dc	DCm_Dm	Qhfm	-	Sand	Marine plains and terraces	Humilive Espodosols and Haplic Gleysols	Porous aquifer	Farming, forestry and pasture, urban area and water
	DCmc_Dmar	Qhm, Qhmp	-	Peat, clay, sand and water	Marine plains and terraces	Haplic Espodosols	Porous aquifer	Farming, forestry and pasture, urban area and beach
	Dca	Qha	-	-	River plains and terraces	Haplic Cambisols	Fissural aquifer	Native vegetation
	DC_Tec	Technogenic deposits	-	Clay, sand and gravel	Technogenic deposits (mining)	Haplic cambisols and Humilive Espodosols	Porous aquifer	Mineral exploitation

DCMU	DCMUm _g	-	PSc _{cm} b	-	Low hills and escarpments of Serra do Mar	Haplic Cambisols and Lithalic Neosols	Fissural aquifer	Native vegetation
DCGR2	DCGR2alc	-	PSc _{pp} , Diabase and Porphyry diorite dike and Bertio _g a Caraguat _{at} uba Fault	Clay and gravel	Escarpments of Serra do Mar, high hills, low hills, morrotes and low hills with gentle slopes	Haplic Cambisols and Lithalic Neosols	Fissural aquifer	Native vegetation
DCGMGL	DCGMGL _g ni	-	PMS _{pg} n	-	Low hills with gentle slopes	Haplic Cambisols	Fissural aquifer	Native vegetation
	DCGMGL _g no	-	PSc _{gg} , Porphyry diorite dike and Bertio _g a Caraguat _{at} uba Fault and defined Fault	-	Escarpment of Serra do Mar, low hills with gentle slopes, low hills and high hills	Haplic Cambisols and Lithalic Neosols	Fissural aquifer	Native vegetation
	DCGMGL _q t	-	Ac _q and Porphyry diorite dike	-	Escarpment of Serra do Mar, low hills with gentle slopes and high hills	Haplic Cambisols and Lithalic Neosols	Fissural aquifer	Native vegetation

4.4.3 Use and occupation maps

To evaluate the use and availability of geodiversity in the municipality of Caraguatatuba, a comparison of land use and occupation maps was carried out for the last 30 years (Fig. 6). During this period (between 1990 and 2020) these parameters have considerably changed. The main alterations were observed essentially in native vegetation, a category that displayed the higher decrease in area, with about 6.91 km² in the Atlantic Forest (Table 4).

In contrast, from 1990 to 2020 the urban area increases 6.04 km², especially in the northern portion, being the second category in expansion and one of the factors responsible for the suppression of native vegetation and the beaches, which had a decline of 0.87 km².

Agriculture, forestry and pasture activities displayed great support in the municipality, with a decrease of 0.34 km² from 1990 to 2020. Agriculture and forestry activities are concentrated mainly in the areas near to the Serra do Mar slope, while pasture predominates in the other areas of the coastal plain.

Mining activity is in the area since the 1970s, with a gradual increase over the past thirty years, represented by 0.29 km². In comparison to the other exposed soil areas, which are often recovering areas, there was a reduction of about 0.63 km².

Regarding the water category, the water bodies were vectorized on the mapping scale. However, an increase of 0.21 km² was observed, which can be explained by the increase in the water table level in a mining area (Fig. 6B).

In recent years, a new class of use has emerged: the industrial complex, with an area of 0.67 km².

Table 4 – Classes of land use and occupation by area in Caraguatatuba, where the signs + and – correspond to increase and decrease, respectively

Class of use and occupation	1990 Area (Km ²)	2020 Area (Km ²)	Change (Km ² / Area)
Beach	1.92	1.05	(-) 0.87
Water	0.94	1.15	(+) 0.21
Native vegetation	386.34	379.43	(-) 6.91
Exposed soil	0.97	0.34	(-) 0.63
Urban area	36.55	42.59	(+) 6.04
Farming, forestry and pasture	59.35	58.97	(-) 0.38
Mineral exploitation	0.38	0.67	(+) 0.29
Industrial complex	-	0.67	(+) 0.67

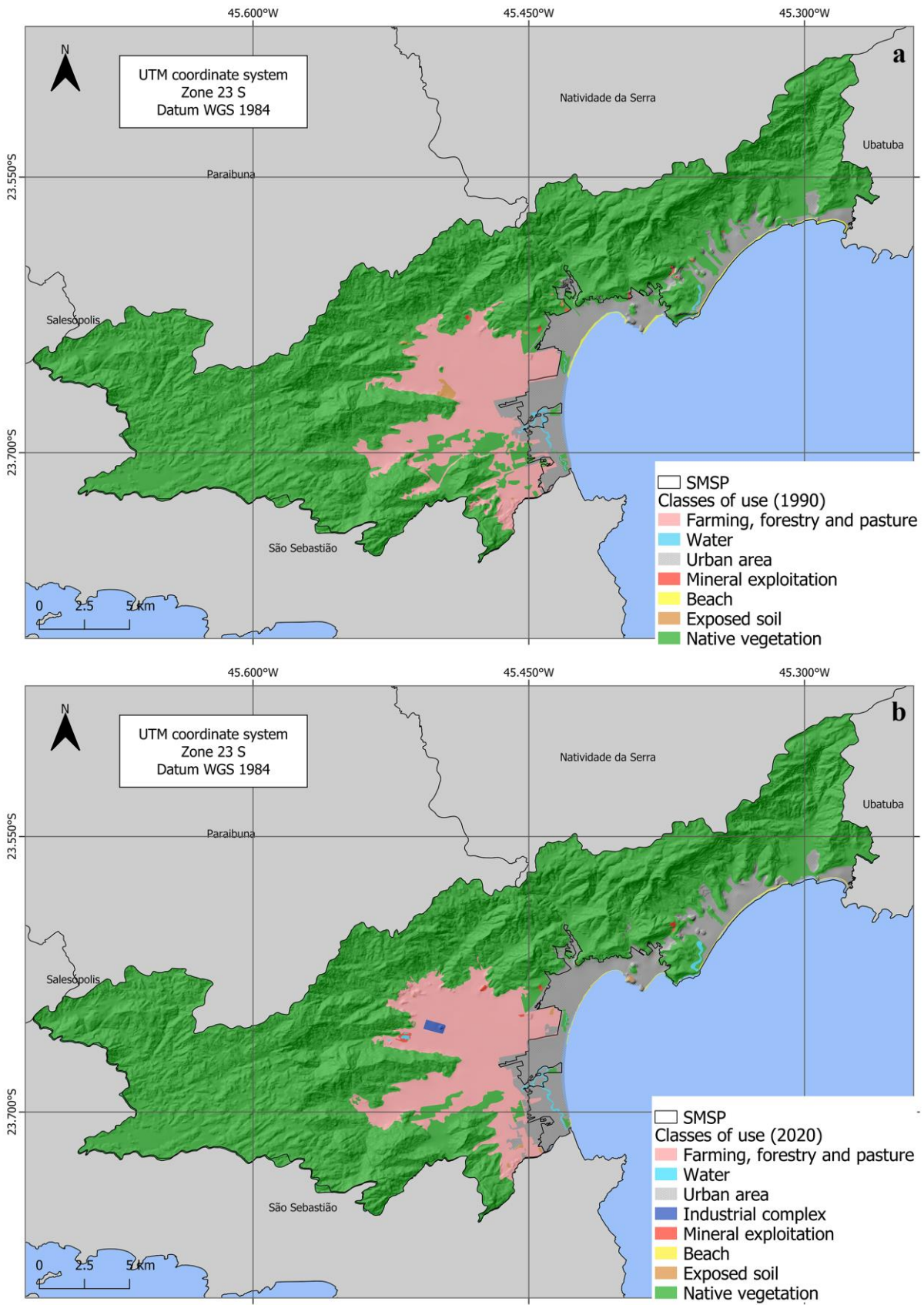


Figure 6 – Land use and occupation maps in Caraguatatuba. (a) 1990 and (b) 2020

4.5 Discussion

4.5.1 Geodiversity characterization

The geoenvironmental map indicates that the five units of the denudational domains shows the higher slopes in the area (5-45 °), being susceptible to natural processes, such as erosion and landslides, when associated with rainy periods, deficient soil cover and / or inadequate use, which implies on limitations to their use (table 5). Some units display considerable structural control of strike-slip shear zones, which influence the drainage system and mark the limits between the DCGR2alc, DCGMGLgno and DCMUmg units. The mineral resources are characterized by granites and gneisses. The fractured aquifers in crystalline rocks are poorly- to well developed, guaranteeing support for the dense Atlantic Forest (Fig. 7). Additionally, the area displays important scenic character, explored by the SMSP through trails and viewpoints.



Figure 7 – Atlantic Forest (a) Panoramic view and (b) Tropeiros trail in the SMSP

The six units in the flatten areas show slopes below 5°, being important for the development of urban settlements, agriculture, pasture and forestry. The sandy beaches guarantee the sedimentary processes by river and marine agents, which regulate the rock cycle and have potential use in touristic activities. Among the limitations are the susceptibility to flooding by rivers and the erosive coastal processes that characterize risks to structures and buildings. Mineral resources are represented by peat, clay, sand, gravel and mineral water in the coastal aquifer, exploited by the industrial and civil construction sectors (table 5).

The geoenvironmental map allows the categorization of geological-environmental units, having as bases similares geological aspects and the correlation with the classes of EGVs (Table 3). The identification of EGVs permits the recognition of geodiversity and its heterogeneity

according to the classes of geology, hydrology, geomorphology and pedology. Its relevance for the present work comes both in the possibility of a diagnosis of geodiversity and in the understanding its threats when related to the use and occupation map.

Table 5 – Potentialities and limitations of the geoenvironmental units in Caraguatatuba (SP)

Geoenvironmental domain	Geoenvironmental unit	Potentialities	Limitations
DC	Technogenic deposits (DC_Tec)	Mineral resources: peat, clay, sand, gravel, gneisses, granite and mineral water.	Geomorphology of featureless hills and very friable gravel in specific locations, which may pose a risk of instability.
	Coastal marine environment (DCmc_Dmar)	Support for biodiversity, river mouths, suitable places for leisure, sports, tourism and urban settlements.	Natural processes can determine some limitations, such as structural ones due to coastal erosion. In addition, the area is highly impermeable, which makes it unsuitable for creating cemeteries and waterproofing works. Plain with possibility of flooding in some places, although susceptibility to flooding is low.
	Environment of recente flood plains (DCa)	Well-drained places suitable for planting vegetables.	Area with predominantly high susceptibility to flooding.
	Mixed environment (marine/continental) (DCm_Dm)	Support varied vegetation and pasture.	Locations unsuitable for works with waterproofing and medium to high susceptibility to flooding, the latter being the most prevalent.
	Mangrove (DCm_Dm1)	Locations conducive to navigation, support and distribution of avifauna and vegetation and sand mining.	Area with high susceptibility to flooding.
DCICT	Predominance of colluvium and talus (DCICT_Co-T)	Mineral resources such as gravel and water capture in the Guaxinduba River by residents.	Susceptibility to landslides predominantly low to medium.
DCGMGL	Undifferentiated gneisses (DCGMGLgni)	Restricted portion in the municipality and no access.	Restricted portion in the municipality and without access and low to medium susceptibility to landslides.
	Predominance of quartzite (DCGMGLqt)	Panoramic landscapes with natural viewpoints, area with a well-developed pedogenetic profile, leisure and tourism activity.	Locations more restricted to the protected area and with access by trails and susceptibility to medium to high landslides in specific locations.

	Predominance of orthorderivate gneisses. May contain migamatitic portions. (DCGMGLgno)	Presence of tributaries of rivers and waterfalls.	Susceptibility to medium to high landslides in places with steeper slopes, with possibilities for mass runs.
DCMU	Metamafics, amphibolite and calcissilitics gneisses (DCMUmg)	Soil outcrops with well-developed profiles, tourist sites with access to rivers.	Predominance of chemical weathering (spheroidal exfoliation), physical and biological with susceptibility to medium to high landslides with possibilities of mass runs.
DGCR2	Subalkaline granitic series: calcialkaline and tholeitic (DGCR2_alc)	Support for cemeteries, panoramic landscapes for viewpoints, trails, protection of springs by the neosols at the top of Serra do Mar, waterfalls, haplic cambisols as support for the Atlantic Forest, infrastructure for Petrobras gas pipelines, landforms geosites and geodiversity sites and mineral resources for the civil construction.	Soil profiles probably shallow and covered by vegetation, terrains with steep topography, soil and rock properties that trigger landslides (high to medium susceptibility to mass movement and mass flows) and area prohibited to the exploitation of natural resources, only indirect use.

The method used for the geoenvironmental mapping was based on the Geological Survey of Brazil. This method highlights the geological characteristics as a conditioning factor for the other environmental aspects, since they have a direct influence on hydrology and soil formation, for example. The description of the geoenvironmental domains show that geological aspects predominate over geomorphological ones. The diversity of geomorphology of the landforms is conditioned by both endogenous and exogenous factors, as highlighted by Ross and Moroz (1992). For these reasons, the geoenvironmental units show different relief patterns, in contrast to the geoenvironmental map created by Santos et al. (2019) in which the geomorphology was the basis for the map.

Geoenvironmental mapping has been applied in different contexts of territorial management, such as to assess the availability of mineral resources and sustainable development (Shrestha et al., 1999) and to land use in Lanzhou, China (Dai, Lee e Zhang, 2001). Rahmati et al. (2017) used this approach to evaluation gully erosion in the semi-arid region of Iran. In Brazil, these maps are being used in Economic Ecological Zoning (EEZ), an instrument that directs economic, social and environmental uses.

The combination of geoenvironmental map and vegetation maps allowed to understand a qualitative correspondence between the two components of natural diversity in Armação dos Búzios county (Rio de Janeiro, Brazil) (Santos et al., 2019). In protected areas to understand the role of geodiversity and its active participation in the ecosystem functions and services contributes to the improvement of conservation strategies, as they guarantee their maintenance (Crofts et al. 2020). The geoenvironmental maps also provide environmental responses related to ES potentialities in each geoenvironmental unit. As examples, Gonçalves (2018), Macedo et al. (2017) and Souza and Luna (2008) establish relationships between geodiversity and biodiversity, reporting the contribution of an adequate assessment of geodiversity in the identification of ES, mainly in the support function and the relationship between management of the physical environment and conservation of biodiversity.

The geoenvironmental mapping can also be used to identify the Ecosystem services (ES) provided by geodiversity, which are understood as goods and functions from the abiotic nature that directly or indirectly benefit society (Brilha et al. 2018; Gray 2019). This the central role of geodiversity in ES may be a useful tool for nature conservation and, in particular, for the creation of protected areas. The integration of EGVs and land use and occupation maps, as proposed in the quantitative method by Reverte et al. (2020), can also help in this assessment. For the authors, inserting EGVs in the identification of ES and their impacts demonstrated the

strong relationship and potential of geodiversity elements in the provision of these services, since they are directly and indirectly dependent.

Thus, geoenvironmental maps and EGVs can be used as a tool for the identification, description and evaluation of geodiversity, providing an overview from a synthetic map with legends directed to the limitations and potentialities of each geoenvironmental unit (Peixoto 2010; Rodrigues 2018). It makes it possible to guide strategies for the sustainable use of specific units, in addition, to be easily handled by managers and decision-makers regarding the physical, economic and social spheres of territorial management. The use of geoenvironmental maps increases the insert of geodiversity in land management and corroborates (i) diagnosis of the physical environment and incorporation of geodiversity in protected areas, which improves conservation strategies; (ii) establishment of geological frameworks for the recognition of geosites and conservation of key locations in the geological history of the Earth and (iii) organization of economic activities and development of urban areas, contributing to existing statutory elements, such as the Economic Ecological Zoning (EEZs). Geoconservation is a key tool for proposing strategies and provides an indirect contribution to the conservation of biodiversity and social well-being.

4.5.2 Land use and anthropogenic impacts

The coastal plain of the municipality of Caraguatatuba (SP) is the main urban expansion area with the exploitation of natural resources as agricultural products, natural gas and civil construction, and mass tourism, especially on the beaches. According to Gray (2004) and Kiernan (2010), human activities can result in pressures to geodiversity, but little is held about the limitations of the abiotic elements (Brilha 2005). As a result, the threats can be configured by partial or total loss of geodiversity elements, visual impact, and loss of access to the sites, interruption or alteration of natural processes, among others (Gray 2004).

The urbanization process in Caraguatatuba dates to the 1950s, with a growing expansion in the real estate market due to tourist and structural interests (construction of highways and the Port of São Sebastião). This caused an increase in the relocation of labor to sectors of civil construction, growth of the urban population, and the marginalization of traditional communities, being intensified since 1970 (Gigliotti and Santos 2013). Data on the population in the period analyzed indicates an increase of 70,511 inhabitants between the years 1990 and 2020 (IBGE 1991, 2020), resulting in the continuous occupation along the coastline (Fig. 8), a fact that was replicated in the land use and occupation maps (Fig. 6).

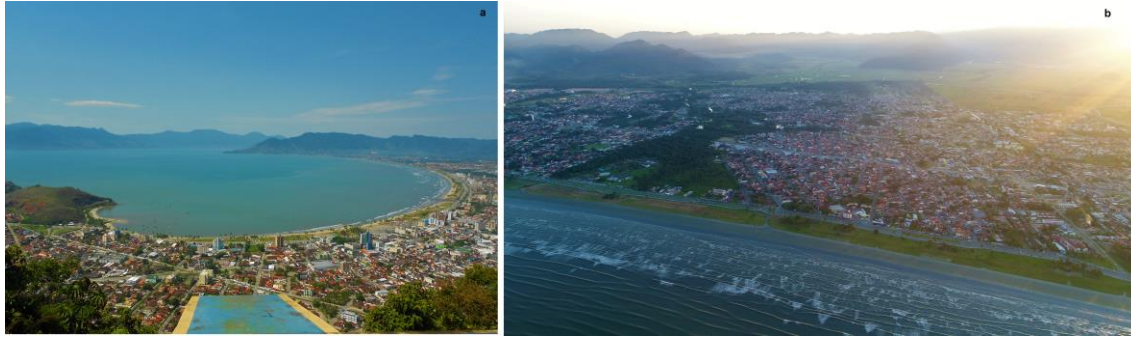


Figure 8 – Urbanization pattern in Caraguatatuba. (a) Caraguatatuba shore and (b) coastal plain with views of the Serra do Mar in the background

Although this urban growth has been preferentially consolidated in the coastal plain, there is an excess of the space destined for it, reaching the buffer zone (BZ) of the SMSP, which registered an increase of 6.04 km² in the last three decades. The BZs are important in the regulation of activities with negative impacts that may compromise the protected area and its benefits to society. Places of geological interest, such as the Holocene and Pleistocene beach ridges, are highly threatened and being destroyed by mining activities and impermeabilization of marine terraces (Souza 1992).

The beach deposits show a decrease of 0.87 km² in its area, explained by natural and anthropic factors. Souza and Luna (2010) identified erosion in the beaches of Massaguaçu and Tabatinga, related to the variations in the coastline. The authors concluded that the retrogradation in the last decades caused by the increase in the relative sea level, inversions in the coastal drift cells and beach rotation, may explain part of the loss observed in the use and occupation map (Table 4).

Anthropic factors as urbanization, can cause the occupation of the backshore increasing the vulnerability to coastal erosion, especially if rigid structures are installed, modifying the beach system causing loss of vegetation. In addition, the presence of inadequate solid waste affects the quality of the beaches and the ESs provided by them. In this sense, Oliveira et al. (2011) point out to the variation in both quantity and distribution of waste in the beach face and in the post-beach of Massaguaçu, influenced by a set of parameters, such as adjacent urbanized areas, rainfall, storm drains, intensity of winds and waves and waste entry points, which should be considered in future assessments.

Among the mining areas, the Massaguaçu quarry stands out (Fig. 9) as an enterprise that works since before 1970 which showed growth and maintenance of activities even after its insertion in a protected area.



Figure 9 – Massaguaçu Quarry

Due to the strict protection character of SMSP, these activities are not allowed, which lead to conflicts between economic interests, the conservation unit guidelines and the Economic Ecological Zoning (EEZ 2017). A large part of Massaguaçu Quarry is included in the Z1AEP and Z1 zones, which are designed to research, environmental education, ecotourism, handcraft products, fishing and low impact occupation (Fig. 10). Although the geoenvironmental map indicates a potential for mining activities, the largest area of the quarry is located in the park. This shows inconsistency of the EZZ.

Mining activities produce the exposure of the water table (Fig. 6B), visual impact and changes in the functioning of geomorphological systems. It affects the geodiversity and requires careful evaluation (Gray, 2004). Also, this activity may compromise the well-being of the local population. On the other hand, mining may expose examples of geodiversity (Brilha 2005), becoming places of geological interest with scientific values, as was the case of Massaguaçu Quarry (Garcia et al. 2019).

The environmental concern about these impacts emerged in 1990, highlighting the indicators of environmental degradation, such as shrub and herbaceous vegetation, erosion processes, irregularity of the terrain and exposed soil (Ferreira et al. 2008) and mitigating measures such as the Recovery Program for Degraded Areas (RPAD), developed today at Massaguaçu Quarry.

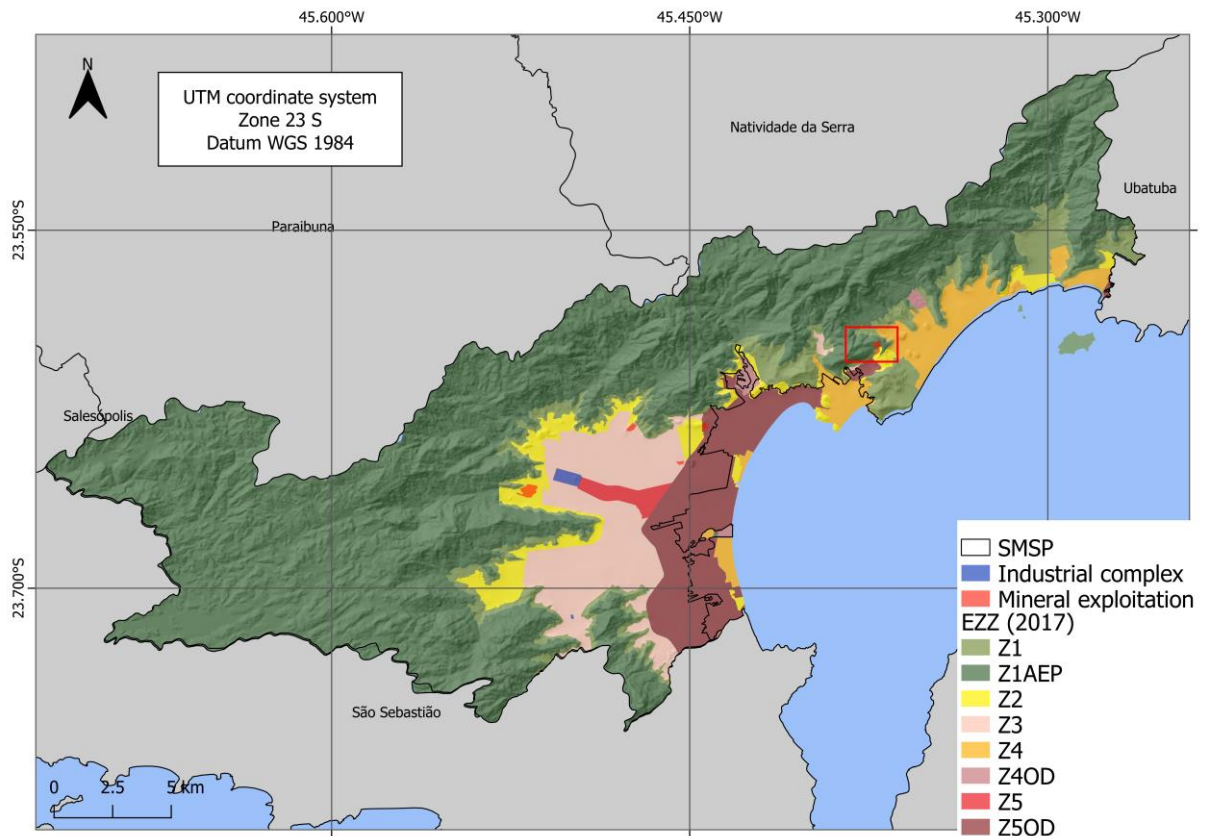


Figure 10 – Economic Ecological Zoning of the municipality of Caraguatatuba (2017), with emphasis on the Massaguaçu Quarry. (Z1) Use on scientific research, environmental education, sustainable management (agroforestry system, handcraft processing of its products), activities related to traditional communities; ecotourism, artisanal fishing and low impact human occupation with rural characteristics; (Z1AEP) Strict protection area, referring to SMSP. Uses provided for in the management plan and specific regulation for indigenous lands; (Z2) In addition to previous uses, aquaculture, mining and dispersed settlements, sparsely populated and with little integration between them; (Z3) In addition to previous uses, agriculture and cattle raising integrated units of improvement, processing or commercialization of agroforestry and fishing products, compatible with environmental characteristics of the area; and forestry, except for invasive species; (Z4 and Z4OD) In addition to previous uses, public facilities and infrastructure for urban development; occupation for urban purposes; support structures for tourism and nautical leisure; tourism and leisure; commercial and service units, and low environmental impact activities (Z5) In addition to the above, all others uses and activities provided that the relevant legal and regulatory standards are met; (Z5OD) In addition to the above, except Z5, low-impact industrial activities; us terminals; and logistics, storage, packaging, transport and distribution of products and goods.

The industrial complex displayed in figure 6B is a Petrobras gas treatment unit (Fig. 11), which produces three types of gases from processing in the Mexilhões field, Santos Basin (Secron et al. 2008): natural gas; liquefied petroleum gas (cooking gas) and C5 + gas (condensed). If compared to that of EEZ (2017), the complex covers zones Z3 and Z5, with gas pipelines being inserted in the latter, which allows for low impact activities. Although biodiversity has not been affected in the long term (Narita et al. 2013), the activity may cause threats to geodiversity, since the processing of natural gas emits considerable amounts of CO₂ and CH₄, particles and SO_x and NO_x, which leads to acid rain (Silveira 2015). Offshore dredging

can modify the ocean floor, increasing coastal erosion - as observed at Centro beach, which presents high risk of erosion (Souza 2009).



Figure 11 – Industrial complex – Petrobras gas treatment unit in Caraguatatuba plain

According to Lima and Oliveira (2017), the main agricultural activities are plantations of banana, corn, sugar cane, heart of palm, among others, produced by family farming and sold in the local markets. Other land activity in the study area is cattle breeding, which plays a fundamental role in the development of the region.

4.6 Conclusions

Suitable assessment of geodiversity is essential to enhance its use in land use planning policies. The combination of geoenvironmental maps, EGVs, and land use and occupation maps indicate important heterogeneities in the study area regarding its lithological, geomorphological, pedological, and hydrological features. The evaluation carried out allows us to affirm that: (i) geodiversity does not manifest itself in proportion to the size of the area, since the context is regional; (ii) geodiversity is directly related to the local economic activities, among which mining, agriculture, pasture and forestry stands out, in addition to beach tourism, trails and viewpoints in SMSP; (iii) even it provides economic and welfare benefits for the region, geodiversity has been threatened by anthropic factors, include in protected area, the solution of which is urgent for the development of conservation strategies; (iv) the assessment of geodiversity in terms of homogeneous units enhances its insertion in the territorial management, which can lead to more effective conservation strategies and (V) can favor environmental activities in protected areas.

In the municipality of Caraguatatuba, geodiversity is related to biodiversity and the use and occupation of the territory. However, human activities such as mass tourism and real estate speculation are major threats to the natural environment. As part of natural diversity, incorporate geodiversity into environmental management is essential to overcome the socio-environmental problems that arise, many of them of a global nature. The generation of robust data may provide public policies that address nature in an integrated manner and prioritize conservation. Regarding this, the method for surveying and assessing geodiversity are crucial and allows mapping the basis on which the elements of biodiversity and human activities are placed accurately.

The integrated characterization of the region's geodiversity emerges as a new approach that contributes to the assessment of ecosystem services and allows the analysis of geological heritage. This integration is essential to develop proposals for the promotion and the insertion of geodiversity in territorial ordering, particularly in protected areas, which are valuable strongholds for the preservation of ecosystems and whose role for society should be valued.

Funding

This work was supported by the Sao Paulo Research Support Foundation (FAPESP) [process 2019/19527-5], and by the National Council for Technological and Scientific Development (CNPq) [process 130693/2020] (Master's scholarship). M.G. Garcia thanks the CNPq [Grant 309964/2018-0].

Conflicts of interest/ Competing interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Author contributions

Laura Pereira Balaguer: Conceptualization, Methodology, Data curation, Formal analysis, Visualization, Investigation and Writing – original draft. **Maria da Glória Motta Garcia:** Conceptualization, Methodology, Supervision, Writing - Review and Editing. **Lígia Maria de Almeida Leite Ribeiro:** Conceptualization, Methodology, Writing - Review and Editing.

References

Alahuhta J., Ala-Hulkko T., Tukiainen H., Purola L., Akujärvi A., Lampinen R., & Hjort J., 2018, The role of geodiversity in providing ecosystem services at broad scales: Ecological

- Indicators, 91:47-56, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.068>.
- Almeida F.F.M. de, 1964, *Geologia do estado de São Paulo: Boletim*, n. 41.
- Almeida F.F.M., Carneiro C.D.R., 1998, *Origem e evolução da Serra do Mar: Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, 2:135-150, <https://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/11205/10667>.
- ANM., 2020, <http://sigmine.dnpm.gov.br/webmap/>.
- Araujo A.M., Pereira, D.I., 2018, A New Methodological Contribution for the Geodiversity Assessment: Applicability to Ceará State (Brazil): *Geoheritage*, 10:591-605, <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0250-3>.
- Arruda K.E.C., Garcia M.G.M., Del Lama E.A., 2017, Inventário e quantificação do patrimônio geológico do município de Caraguatatuba, São Paulo: *Geociências*, (36)3:447-462, <https://doi.org/10.5016/geociencias.v36i3.11340>.
- Arruda, K. E. C., 2017, *A Geoconservação como subsídio à gestão territorial sustentável: o mapa geoturístico do litoral norte do estado de São Paulo [Tese de doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 10.11606/T.44.2018.tde-26042018-091309*.
- Betard F., Peulvast J.P., 2019, Geodiversity Hotspots: Concept, method and cartographic application for geoconservation purposes at a regional scale: *Environmental management*, 63(6): 822-834, <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01168-5>.
- Brilha J., 2005, *Patrimônio geológico e geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica: Palimage Editores, Braga, 190p*.
- 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*, 86, 19-28, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.001>.
- Cerri R.I., Rosolen V., Reis F.A., Filho A.J.P., Vemado F., do Carmo Giordano L., Gabelini B.M., 2020, The assessment of soil chemical, physical, and structural properties as landslide predisposing factors in the Serra do Mar mountain range (Caraguatatuba, Brazil): *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1-14, <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01791->.
- Coutinho J.M.V., 2008, *Enxame de diques da junção tríplice do Paraná, Brasil meridional: Geologia USP. Série Científica*, 8(2): 28-52, <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2008000200003>.
- CPRM, 1982, *Projeto integração geológica da região metropolitana de São Paulo: Relatório, Folhas geológicas Caraguatatuba e Natividade da Serra 1:50, 000*.
- CPRM, 1991, *Projeto integração geológica da região metropolitana de São Paulo: Relatório, Folha geológica Pico do Papagaio 1:50, 000*.
- CPRM, 2017, *Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações – Município de Caraguatatuba (SP) 1:50 000*, <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/19381?show=full>.
- Crisp J.R., Ellison J.C., Fischer A., 2020, Current trends and future directions in quantitative geodiversity assessment: *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, <https://doi.org/10.1177%2F0309133320967219>.
- Crofts R., Gordon J.E., 2015, *Geoconservation in protected areas: Protected area governance and management. ANU Press, Canberra, 531-568*, <https://www.jstor.org/stable/j.ctt1657v5d.25>.
- Croft, R., Gordon, J.E., Brilha J., Gray, M., Gunn, J., Larwood, J., Santucci, V.L., Tormey, D., Worboys, G.L., 2020, *Guidelines for geoconservation in protected and conserved areas: Best practice Protected Areas Guidelines Series N°31. Gland, Switzzeland: IUCN*, <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.31.en>
- Cruz O., 1974, *A Serra do Mar e o litoral na região de Caraguatatuba: Revista Brasileira de Geografia*, 37(3): 73-138.

- Cruz O., 1990, Contribuição geomorfológica ao estudo de escarpas da Serra do Mar: *Revista do Instituto Geológico*, 8(1): 9-20, <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.19900002>.
- Dai, F. C., Lee, C. F., & Zhang, X. H., 2001, GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study: *Engineering geology*, 61(4), 257-271, [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00028-X).
- Dantas M.E., 2016, Catálogo de Padrões de relevo no território brasileiro, <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/16589>.
- Dias V.C., Martins T.D., Gramani M.F., Coelho R.D., Dias H.C., Vieira B.C., 2019, Morphology of debris flow deposits from a 1967 event in Caraguatatuba, Serra do Mar, Brazil: The Association of Environmental and Engineering Geologists; special publication 28. Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library, <http://dx.doi.org/10.25676/11124/173160>.
- Dunlop I., Larwood J.G., Burek C.V., 2018, Geodiversity Action Plans: A method to facilitate, structure, inform and record action for geodiversity: Reynard, E.; Brilha, J. (Eds.) *Geoheritage: Assessment, Protection and Management*. Elsevier, p. 53-65, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00003-4>.
- Fernández A., Fernández T., Pereira D.I., Nieto L.M., 2020, Assessment of Geodiversity in the Southern Part of the Central Iberian Zone (Jaén Province): Usefulness for Delimiting and Managing Natural Protected Areas: *Geoheritage*, 12:20, <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00447-6>.
- Ferreira C., Sciota L., Vedovello R., Fernandes Da Silva P.C., 2008, Definição e análise dos indicadores de degradação ambiental associada às áreas mineradas no município de Caraguatatuba, SP, DOI: 10.13140/RG.2.1.5117.0724.
- Forte J., 2014, Avaliação quantitativa da geodiversidade: desenvolvimento de instrumentos metodológicos com aplicação ao ordenamento do território. [Tese de doutoramento], Universidade de Minho, Portugal. <http://hdl.handle.net/1822/35857>.
- Forte J.P., Brilha J., Pereira D.I., Nolasco M., 2018, Kernel density applied to the quantitative assessment of geodiversity: *Geoheritage*, 10(2): 205-217, <https://doi.org/10.1007/s12371-018-0282-3>.
- Fox, N., Graham, L. J., Eigenbrod, F., Bullock, J. M., & Parks, K. E., 2020, Incorporating geodiversity in ecosystem service decisions: *Ecosystems and People*, 16(1), 151-159. <https://doi.org/10.1080/26395916.2020.1758214>.
- 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*, 11(4): 1257-1266, <https://doi.org/10.1007/s12371-019-00383-0>.
- Garcia, M.D.G., Lama E.A., Martins L., Mazoca C.E.M., Bourotte C.L., 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*, 91(2), <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201920180514>.
- Garda G.M., Schorscher J.H.D., 1996, Basic and ultrabasic coastal dykes adjacent to the Sao Sebastiao Channel (North coast of Sao Paulo State, Brazil): *Revista do Instituto Geológico*, 17(1/2): 7-31, <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.19960001>.
- Gigliotti C., Santos M.J., 2013, A expansão urbana de Caraguatatuba (1950-2010): uma análise das transformações socioespaciais: *Caminhos de Geografia*, 14(46), <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/17794>.
- Gonçalves J.B., 2018, Mapeamento da geodiversidade no município de Miguel Pereira – RJ: abordagens metodológicas e sua contribuição para a gestão territorial. [Trabalho de Conclusão de Curso], Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/6934>.

- Gray M., 2004, *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. John Wiley & Sons.
- Gray, M., 2011, Other nature: geodiversity and geosystem services: *Environmental Conservation*, 38(3), 271-274, <https://doi.org/10.1017/S0376892911000117>.
- Gray M., 2012, Valuing geodiversity in an 'ecosystem services' context: *Scottish Geographical Journal*, 128(3-4): 177-194, <https://doi.org/10.1080/14702541.2012.725858>.
- Gray M., 2013, *Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature*. (2nd edition): Editora John Wiley Blackwell. England, Londres, 495p.
- Gray M., 2018, *Geodiversity: the backbone of geoheritage and geoconservation*: *Geoheritage*, Elsevier, p. 13-25, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00001->.
- Gray M., 2019, Geodiversity, geoheritage and geoconservation for society: *International Journal of Geoheritage and Parks*, 7(4):226-236, <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2019.11.001>.
- Gramani M.F., 2001, Caracterização geológica-geotécnica das corridas de detritos ("Debris Flows") no Brasil e comparação com alguns casos internacionais. [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.
- Hasui, Y., Carneiro, C.D.R., de Almeida, F.F.M., Bartorelli A., 2012, (Ed.) *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca
- Heilbron M., Pedrosa-Soares A.C., Campos Neto M.D.C., Silva L.D., Trouw R.A.J., Janasi V.D.A., 2004, Província mantiqueira. Mantesso-Neto V, Bartorelli A, Carneiro CDR, p. 203-234, <https://www.researchgate.net/publication/284672209>.
- Hjort J., Gordon J.E., Gray M., Hunter Jr M.L., 2015, Why geodiversity matters in valuing nature's stage: *Conservation Biology*, 29(3): 630-639, <https://doi.org/10.1111/cobi.12510>.
- IBGE, 1991, Censo demográfico 1991. Resultados do universo relativos às características da população e dos domicílios. Rio de Janeiro, p. 1-764. https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/82/cd_1991_n3_caracteristicas_populacao_domicilios_ac.pdf. (Acesso em Novembro 2020).
- IBGE, 2010, Arranjos populacionais e concentrações urbanas do Brasil. Coordenação de Geografia, 2ª edição, Rio de Janeiro. ISBN 978-85-240-4406-9. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=299700>. (Acesso em 15 de Dezembro de 2020).
- IBGE, 2017, Hidrogeologia 1:250, 000. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geologia/15824-hidrogeologia.html?=&t=downloads>. (Acesso em 15 Dezembro 2020).
- IBGE, 2020, Caraguatatuba. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/caraguatatuba/panorama>. (Acesso em 29 Novembro de 2020).
- IUCN, 2008, Resolución 4.040 Conservación de la geodiversidade y el patrimonio geológico, https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/resrecfiles/WCC_2020_RES_088_ES.pdf. (Acesso em 15 Dezembro de 2020).
- IUCN, 2012, Resolución 048 Valorización y conservación del patrimonio geológico dentro del Programa de la IUCN 2013-2016. https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/resrecfiles/WCC_2012_RES_48_ES.pdf. (Acesso em 15 de Dezembro 2020).
- Kiernan K., 2010, Human impacts on geodiversity and associated natural values of bedrock hills in the Mekong Delta: *Geoheritage*, 2(3-4): 101-122, <https://doi.org/10.1007/s12371-010-0015-8>.
- Kozłowski, S., 2004, Geodiversity. The concept and scope of geodiversity: *Przegląd Geologiczny*, 52(8/2): 833-837.
- Lima, A.O., Tessler, M.G., Turra, A., 2011, Distribuição de lixo ao longo de praias arenosas—Estudo de caso na Praia de Massaguaçu, Caraguatatuba, SP: *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 11(1):75-84,

- <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340132009>.
- Lima C.O., de Oliveira R.C., 2018, Proposta de zoneamento geoambiental para o município de Caraguatatuba-SP: *Geosul*, 33(67): 140-161, <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2018v33n67p140>.
- Macedo Y., Silva E., Oliveira V., Correia J., Medeiros S., Costa D., Cestaro L., 2017, Serviços ambientais das unidades geoambientais no município de São Miguel do Gostoso/RN, Brasil. *GOT: Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, 12: 205-229, <dx.doi.org/10.17127/got/2017.12.009>.
- Mohriak W., Nemčok M., Enciso G., 2008, South Atlantic divergent margin evolution: rift-border uplift and salt tectonics in the basins of SE Brazil: Geological Society, London, Special Publications, 294(1): 365-398, <https://doi.org/10.1144/SP294.19>.
- Mora C.A.S., Campanha G.A.C., Wemmer K., 2013, Microstructures and K-Ar illite fine-fraction ages of the cataclastic rocks associated to the Camburu Shear Zone, Ribeira Belt, Southeastern Brazil: *Brazilian Journal of Geology*, 43(4):607-622, DOI: 10.5327/Z2317-48892013000400003.
- Narita J., Oehlmeyer A.S., Alves F.A., Bortolotte A.C., Basbaum M., Rodrigues T.D., 2013, Results of four-year fauna monitoring in the caraguatatuba-taubaté (gastau) pipeline: Rio Pipeline Conference and Exposition, https://www.academia.edu/4788041/Master_IBP1484_13_RESULTS_OF_FOUR_YEAR_FAUNA_MONITORING_IN_THE_CARAGUATATUBA_TAUBAT%C3%89_GASTAU_PIPELINE_Copyright_2013_Brazilian_Petroleum_Gas_and_Biofuels_Institute_IBP. (Acesso em 11 Novembro de 2020).
- Nascimento M.A.L., da Silva M.L.N., de Moura-Fé M.M., 2020, Os Serviços Ecológicos em Geossítios do Geopark Araripe (CE), Nordeste do Brasil: *Anuário do Instituto de Geociências UFRJ*. 43:119- 132, https://doi.org/10.11137/2020_4_119_132.
- Nieto L.M., 2001, Geodiversidad: propuesta de una definición integradora: *Boletín Geológico y minero*, 112(2):3-12, http://asgmi.igme.es/Boletin/2001/112_2-2001/1-ARTICULO%20%20GEODIVERSIDAD.pdf. (Acesso em 3 Dezembro de 2020).
- Pereira D.I., Pereira P., Brilha J., Santos L., 2013, Geodiversity Assessment of Paraná State (Brazil): Na Innovate Approach: *Environmental Management* 52: 541-552, <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>.
- Peixoto P., 2010, Geodiversidade do Estado de São Paulo. Peixoto (Org.), São Paulo: CPRM. <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/16776>. (Acesso em 3 Dezembro de 2020).
- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R., & Feizizadeh, B. 2017, Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework: *Science of the Total Environment*, 579, 913-927, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.176>.
- Ramos M.A.B, Dantas M.E., Maia M.A.M., Machado M., Pfaltzgraff P.A., Ambrosio M.F., Osório C, 2018, Proposta Metodológica para Levantamento da Geodiversidade em escalas 1: 100 000 a 1: 50 000 em Regiões Metropolitanas. Projeto Geodiversidade. Departamento de Gestão Territorial, CPRM, <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21731>. (Acesso em 3 Dezembro de 2020).
- Reverte F.C., Garcia M.G.M., Brilha J., Pellejero A.U., 2020, Assessment of impacts on ecosystem services provided by geodiversity in highly urbanised areas: A case study of the Taubaté Basin, Brazil: *Environmental Science & Policy*, 112:91-106, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.05.015>.
- Rodrigues F.H., 2018, Estudo da geodiversidade da região norte da Ilha de São Sebastião (SP): uma proposta de mapeamento geoambiental aplicado à estratégia de geoconservação, [Tese de doutorado]: Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, <http://hdl.handle.net/11449/152822>.

- Rossi M., 2017, Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, V.1. 118p. (inclui Mapas). ISBN: 978-85-64808-16-4. https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/wp-content/uploads/sites/234/2017/11/Livro_Solos1.pdf. (Acesso em 20 Dezembro de 2020).
- Ross J.L.S., 1992, O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo: *Revista do departamento de Geografia*, 6:17-29, <https://doi.org/10.7154/RDG.1992.0006.0002>.
- Ross J.L.S., Moroz I.C., 1996, Mapa geomorfológico do estado de São Paulo: *Revista do Departamento de Geografia*, 10:41-58, Doi: 10.7154/RDG.1996.0010.0004.
- Santos D.S., Mansur K.L., Gonçalves J.B., Junior E.R.A., 2017, Quantitative assessment of geodiversity and urban growth impacts in Armação dos Búzios, Rio de Janeiro, Brazil: *Applied geography*, 85: 184-195, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.03.009>.
- Santos D.S., Mansur K.L., de Arruda Jr E.R., Dantas M.E., Shinzato E., 2019, Geodiversity Mapping and Relationship with Vegetation: A Regional-Scale Application in SE Brazil: *Geoheritage*, 11(2): 399-415, <https://doi.org/10.1007/s12371-018-0295-y>.
- São Paulo, 2019, Parque Estadual Serra do Mar Caraguatatuba. <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/pesm/nucleos/caraguatatuba/>. (Acesso em 10 Dezembro de 2020).
- Secron M.B., Hurtado S.N., Medeiros S.S., de Oliveira W.J., 2008, Preliminary Environmental Assessment for the site selection for the UTGCA (Gas Treatment Unit for Caraguatatuba-SP): 7th International Pipeline Conference, <http://dx.doi.org/10.1115/IPC2008-64244>.
- Serrano E, Ruiz-Flaño P., 2007, Geodiversity: a theoretical and applied concept: *Geographica Helvetica*, 62(3): 140-147, <https://doi.org/10.5194/gh-62-140-2007>.
- Silva C.R., Dantas M.E., 2010, Mapas geoambientais, http://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/17873/1/mapas_geoambientais_sbcgg.pdf. (Acesso em 3 Dezembro de 2020).
- Silva M.L.N., do Nascimento M.A.L., 2020, Ecosystem Services and Typology of Urban Geodiversity: Qualitative Assessment in Natal Town, Brazilian Northeast: *Geoheritage*, 12(3): 1-16, <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00479-y>.
- Silveira E.A., 2015, Caracterização dos fluxos energéticos e gases de efeito estufa em instalações “offshore”, [Dissertação de mestrado]: Brasília, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, <http://dx.doi.org/10.26512/2015.03.D.18426>.
- Soms J., 2017, Assessment of geodiversity as tool for environmental management of protected nature areas in South-Eastern Latvia: *Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference. Volume I (Vol. 271, p. 277)*, <https://doi.org/10.17770/etr2017vol1.2581>.
- Souza C.R.G., 1992, Considerações sobre a origem de um depósito marinho pleistocênico no litoral norte do Estado de São Paulo: *Boletim IG-USP. Série Científica*, 23: 43-54, <https://doi.org/10.11606/issn.2316-8986.v23i0p43-54>.
- Souza C.R., Luna G.C., 2008, Unidades quaternárias e vegetação nativa de planície costeira e baixa encosta da Serra do Mar no litoral norte de São Paulo: *Revista do Instituto Geológico*, 29(1-2): 1-18, <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.20080001>.
- Souza C.R., 2009, A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil: *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 9(1): 17-37, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340125003>.
- Souza C.R.G., Luna G.D.C., 2010, Variação da linha de costa e balanço sedimentar de longo período em praias sob risco muito alto de erosão do município de Caraguatatuba (Litoral Norte de São Paulo, Brasil): *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated*

- Coastal Zone Management, 10(2): 179-199.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340129002>. (Acesso em 15 Dezembro de 2020).
- Schrodt F., et al., 2019, Opinion: To advance sustainable stewardship, we must document not only biodiversity but geodiversity: Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 116, n. 33, p. 16155-16158, <https://doi.org/10.1073/pnas.1911799116>.
- Sharples C., 2002, Concepts and principles of geoconservation: Tasmanian Parks & Wildlife Service, Hobart.
- Shrestha, O. M., Koirala, A., Hanisch, J., Busch, K., Kerntke, M., & Jäger, S., 1999, A geo-environmental map for the sustainable development of the Kathmandu Valley, Nepal: *Geojournal*, 49(2), 165-172, <https://www.jstor.org/stable/41147413>.
- Worboys G.L., Lockwood M., Kothari A., Feary S., Pulsford I (eds), 2015, Protected Areas Governance and Management, ANU Press, Canberra, <http://doi.org/10.22459/PAGM.04.2015>.
- Zoneamento Ecológico Econômico Setor Costeiro do Litoral Norte de São Paulo – Caraguatatuba. 1: 50. 000, 2017, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA/ Coordenadoria de Planejamento Ambiental (CPLA). Grupo setorial de coordenação do Litoral Norte. <http://s.ambiente.sp.gov.br/zee/CARAGUATATUBA.pdf>. (Acesso em 15 Dezembro de 2020).
- Zwolinski Z., Najwer A., Giardino M., 2018, Methods for Assessing Geodiversity: Reynard E, Brilha J. *Geoheritage: Assessment, Protection, and Management*: Elsevier. p. 27-46.

5. ATÉ QUE PONTO OS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS PROVIDOS PELA GEODIVERSIDADE SÃO AFETADOS POR IMPACTOS ANTRÓPICOS? UM ESTUDO QUANTITATIVO EM CARAGUATATUBA, LITORAL SUDESTE DO BRASIL

Artigo submetido à revista Land Use Policy

Resumo

Serviços ecossistêmicos (SE) providos pela geodiversidade são bens que beneficiam direta e indiretamente a sociedade e podem ser classificados nas funções de regulação, suporte, provisão, cultural e conhecimento. A avaliação integrada da geodiversidade com ênfase nos SE é relevante para estratégias de conservação e gestão territorial. O trabalho objetiva a identificação e avaliação dos impactos aos SE providos pela geodiversidade no município de Caraguatatuba e área protegida do Parque Estadual da Serra do Mar (PESM), costa sudeste do Brasil. O método empregado consistiu em duas etapas: (i) identificação dos SE com base no reconhecimento das Variáveis Essenciais da Geodiversidade (EGVs) e consulta bibliográfica e (ii) avaliação quantitativa dos impactos aos SE providos pela geodiversidade. Os resultados permitiram identificar setenta e seis SE providos pela geodiversidade em Caraguatatuba, dos quais as funções mais afetadas pelas categorias de área urbana e vegetação nativa foram, respectivamente: suporte (50,9%), regulação (47,7%), cultural (41,9%), conhecimento (34,9%) e provisão (31,2%). Os resultados indicam uma ferramenta metodológica eficiente e útil para estratégias de gestão territorial e aplicação das leis ambientais.

Palavras-chave: Áreas protegidas, geodiversidade, impactos ao ecossistema, serviços ecossistêmicos

**TO WHAT EXTENT ARE ECOSYSTEM SERVICES PROVIDED BY
GEODIVERSITY AFFECTED BY ANTHROPOGENIC IMPACTS? A
QUANTITATIVE STUDY IN CARAGUATATUBA, SOUTHEAST COAST OF
BRAZIL**

Laura Pereira Balaguer^a, Maria da Glória Motta Garcia^a, Fernanda Coyado Reverte^b, Lígia Maria de Almeida Leite Ribeiro^c

^aCentre for Research Support on Geological Heritage and Geotourism (GeoHereditas), Institute of Geosciences, University of São Paulo, Rua do Lago, 562, SP 05508-030, Brazil. E-mails: laura.balaguer@usp.br; mgmgarcia@usp.br; fernanda.reverte@alumni.usp.br; ligia.ribeiro@cprm.gov.br

Abstract

Ecosystem services (ES) provided by geodiversity are goods that directly and indirectly benefit society and can be classified into regulatory, support, provision, cultural and knowledge functions. The integrated assessment of geodiversity with an emphasis on ES is relevant for conservation and territorial management strategies. This work aims at the identification and assessment of impacts on ES provided by geodiversity in the municipality of Caraguatatuba and a protected area Serra do Mar State Park (SMSP), on the southeast coast of Brazil. The methods used consisted of two steps: (i) identification of the ES based on the recognition of the Essential Variables of Geodiversity (EGVs) and bibliographic research and (ii) quantitative assessment of the impacts on the ES provided by geodiversity. The results allowed to identify seventy-three ES provided by geodiversity in Caraguatatuba, which the ecosystem functions most affected by the categories of urban area and native vegetation were, respectively: supporting (50.9%), regulation (47.7%), cultural (41.9%), knowledge (34.9%) and provisioning (31.2%). The results indicate an efficient and useful methodological tool used in land management strategies towards geodiversity and environmental law enforcement.

Keywords: Ecosystem services, geodiversity, ecosystem impacts, protected areas

5.1 Introduction

The concept of nature integrates both biotic and abiotic portions, highlighting the interrelationship between them emphasized in the term “ecosystem”, coined by Tansley (1935). Efforts to understand the benefits provided by nature to man were established beginning in the 70s and culminated in the concept of ecosystem services (ES), defined as goods and functions that benefit society both directly and indirectly (Erlich e Mooney, 1983; Costanza et al., 1997). Since then, several classifications have been proposed to identify these services, such as: Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005); The Economics of Ecosystem of Biodiversity (TEEB); Common International Classification of Ecosystem Services – CICES (Haines-Young Potschin, 2013); the first being widely disseminated.

In the mid-1990s, this concept began to be approached from an evaluation perspective, highlighting the economic bias (De Groot et al., 2002), which gained momentum with the named natural capital. According to Costanza and Daly (1992), the natural capital are active stocks that produce a flow of goods and services for the future and are distributed into two groups: the natural capital from renewable resources; natural capital from non-renewable resources.

Despite the advances achieved in the field of nature conservation involving the ES, only a few contributions included the abiotic portion and the non-renewable resources. These aspects correspond to geodiversity, a term that considers the variety of geological, geomorphological, hydrological and pedological materials and processes (Gray, 2013). According to Gray (2018), although the mention of services related to water and some non-renewable resources, the classifications and published papers focused mainly on biodiversity, neglecting and limiting the potential of ES provided by geodiversity. However, Queiroz and Garcia (unpublished results) found that even without literally mentioning geodiversity many works focused on ES, including aspects and elements of geodiversity.

Van Ree et al. (2017) points out the representation scarcity of ES provided by subsurface in academic works, which results in an unbalanced nature conservation policies. Regarding this, Gray (2011; 2013) and Gordon e Barron (2013) described for the first time the ES provided by geodiversity, with updates in Brilha et al. (2018) and Gray (2019). While the classification by Brilha (2018) is arranged by seventeen services distributed into four functions (regulation, supporting, provisioning and cultural) according to MEA (2005). Meanwhile, Gray’s classification (2013) has twenty-five services and adds a fifth function named ‘knowledge’ – related to the specifics of learning and teaching Geosciences.

Even though it has increased in recent decades, geodiversity is neglected both in the international sphere and in the Brazilian nature conservation unit. In general, the chapter dedicated to the physical is undervalued, implying a weakened management of conservation strategies. In this sense, the current work focuses on the county of Caraguatatuba, located on the north coast of the São Paulo state, Brazil, and home to one of the state's most important protected areas: The Serra do Mar State Park (SMSP). The county is part of a growing urbanization context, which began mainly with the construction of the Rio-Santos and Tamoios highways in 60s and 70s, and now is being intensified by real estate speculation.

The work aims to identify the ES provided by geodiversity for the county, with an emphasis on the SMSP area, and to assess the anthropogenic impacts of these services. The evaluation was based by the methodology proposed by Reverte et al. (2020). Three questions guide this work: (i) What are the ES provided by the geodiversity of the Caraguatatuba county?; (ii) What are the losses assessed in the study area and how does this impact the identified ES; (iii) How do these ES relate to the protected area and how to insert this approach into Geoconservation strategies in these areas?

5.2 Study area

Caraguatatuba county is located on the north coast of the São Paulo state, southeastern Brazil (Fig. 1). It has an area about 484 km², 125,194 estimated inhabitants and includes the SMSP, conservation unit of integral protection defined by National System of Protected Area, NSPA (Law nº 9985/2000) (São Paulo, 2019; IBGE, 2021).

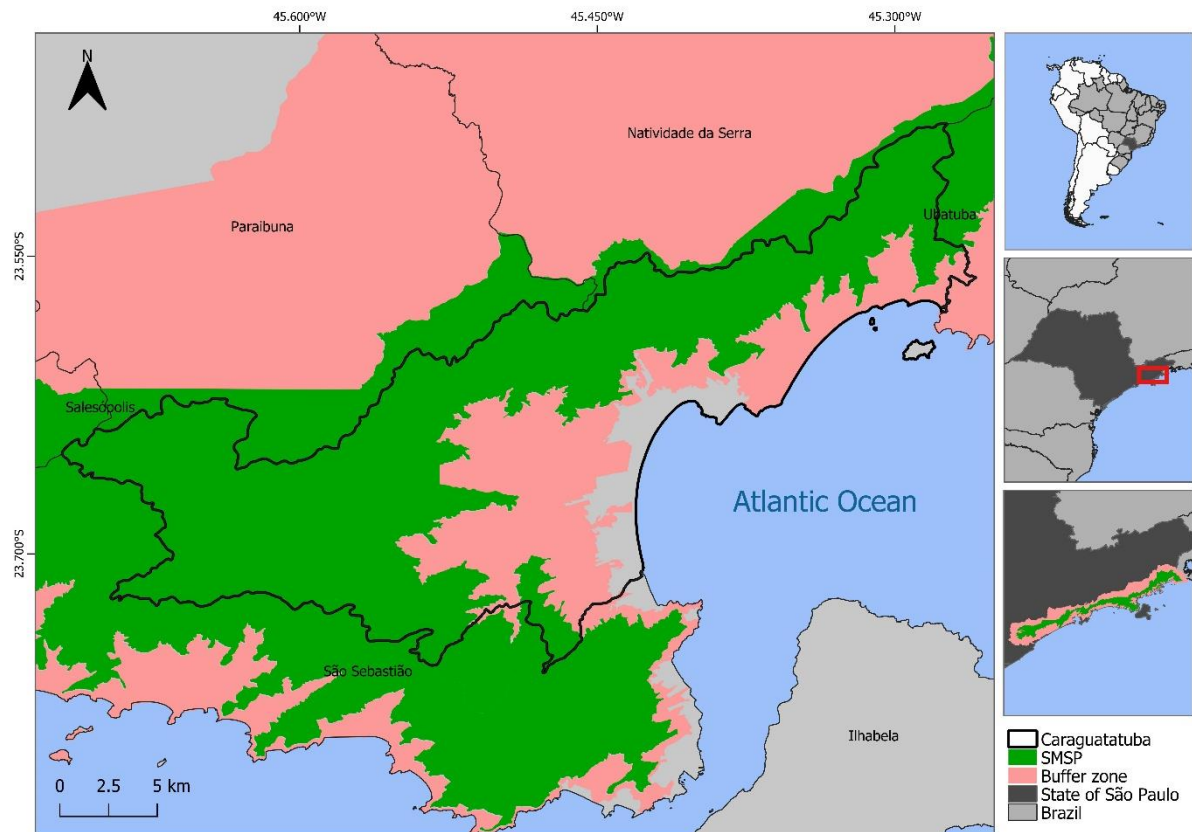


Figure 1 – Location map of the county of Caraguatatuba, north coast of the state of São Paulo, Brazil.

Geologically, the area is located in the Ribeira Orogen, at the Mantiqueira Province, which stretches over in the NE-SW direction along 3000 km southeast Brazil. The geological record ranges from the Neoproterozoic until recent periods and include evidence of the amalgamation and breakup of the Gondwana Supercontinent (Heilbron et al., 2004; Hasui et al., 2012). The subsequent opening of the South Atlantic Ocean, in the Mesozoic (Mohriak et al., 2008), and the formation of the Serra do Mar Mountain Range, in the Cenozoic (Almeida, 1969), as well as variations in sea level in the Quaternary (Souza, 1997) all contributed to the current landscape. Geomorphologically, the area is located in the Costeira Province, composed by the coastal lowlands and the Serra do Mar Mountain range (Almeida, 1964).

5.3 Methodology

The methodological procedures were based on two main steps:

- (i) Recognition of ES provided by geodiversity. To proceed with the identification of the ES, two steps were taken:

a) Classification of the geodiversity elements according to Essential Geodiversity Variables (EGVs). Based on Schrodt et al. (2019) six classes of EGVs were identified in the study area (Table 1).

Table 1 – EGVs definition in Caraguatatuba (SP). Source: Balaguer et al. (unpublished results).

EGVs	Geodiversity elements	Scale	File format	References
Rocks and structures	Rock and structures	1: 50 000	Geological charts	CPRM (1982, 1991)
Unconsolidated deposits	Beaches, mangroves, colluvium and talus	1: 50 000	Geological charts	CPRM (1982, 1991)
Forms of relief	Serra do Mar mountain range, coastal plain, marine and fluvial terraces, high and low hills, morrotes, technogenic deposits and low hills with gentle slopes	1: 25 000	Shapefile	CPRM (2017)
Mineral resources	Peat, gnaisses, granite, gravel, sand and water		Shapefile	ANM (2020)
Soils	Haplic cambisols, humilive spodosols, haplic gleysols, red-yellow latosols and lithalic neosols	1: 750 000	Shapefile	Rossi (2017)
Water resources	Crystalline and coastal aquifers	1: 250 000	Shapefile	IBGE (2017)

b) Identification of ES provided by geodiversity. The research carried out by the consulting theoretical framework in published papers, thesis, dissertation, and books, considering the EGVs and the classification proposed by Gray (2013) (Table 2).

Table 2 – Classification of ecosystem services according to Gray (2013).

Functions	Services
Regulation	Atmospheric and ocean processes
	Terrestrial processes
	Flood regulation
	Water quality regulation
Supporting	Soil processes
	Habitat provision
	Land and water as platforms for human activity
	Burial and storage
Provisioning	Food and drink
	Nutrients and minerals for healthy growth
	Energy
	Construction materials
	Industrial minerals
	Ornamental products
Knowledge	Fossils for sale
	Earth history
	History of research
	Environmental monitoring and forecasting
	Geoforensics
Cultural	Education and employment
	Environmental quality
	Geotourism and leisure
	Cultural, spiritual and historic associations
	Artistic inspiration
	Social development

(ii) Assessment of impacts on ES provided by geodiversity. This step was carried out on the basis of two tools:

a) Land use and occupation maps. The land use and occupation maps were made in the 1: 25,000 scale from the vectorization of satellite images from 1990 and 2020 obtained by Google Earth. Six classes were selected adapted from Balaguer et al. (unpublished results): native vegetation (Atlantic Forest); exposed soil (exposed by human activity); urban area (residential and commercial installations); farming, pasture and forestry (cultivation activities, monoculture and grass vegetation); mineral extraction (mineral exploitation) and industrial complex (installation with standard organization in restricted areas). The land use and occupation maps of

Caraguatubá (Fig. 2) and the quantification of classes (Table 3) shows significant changes over the last three decades.

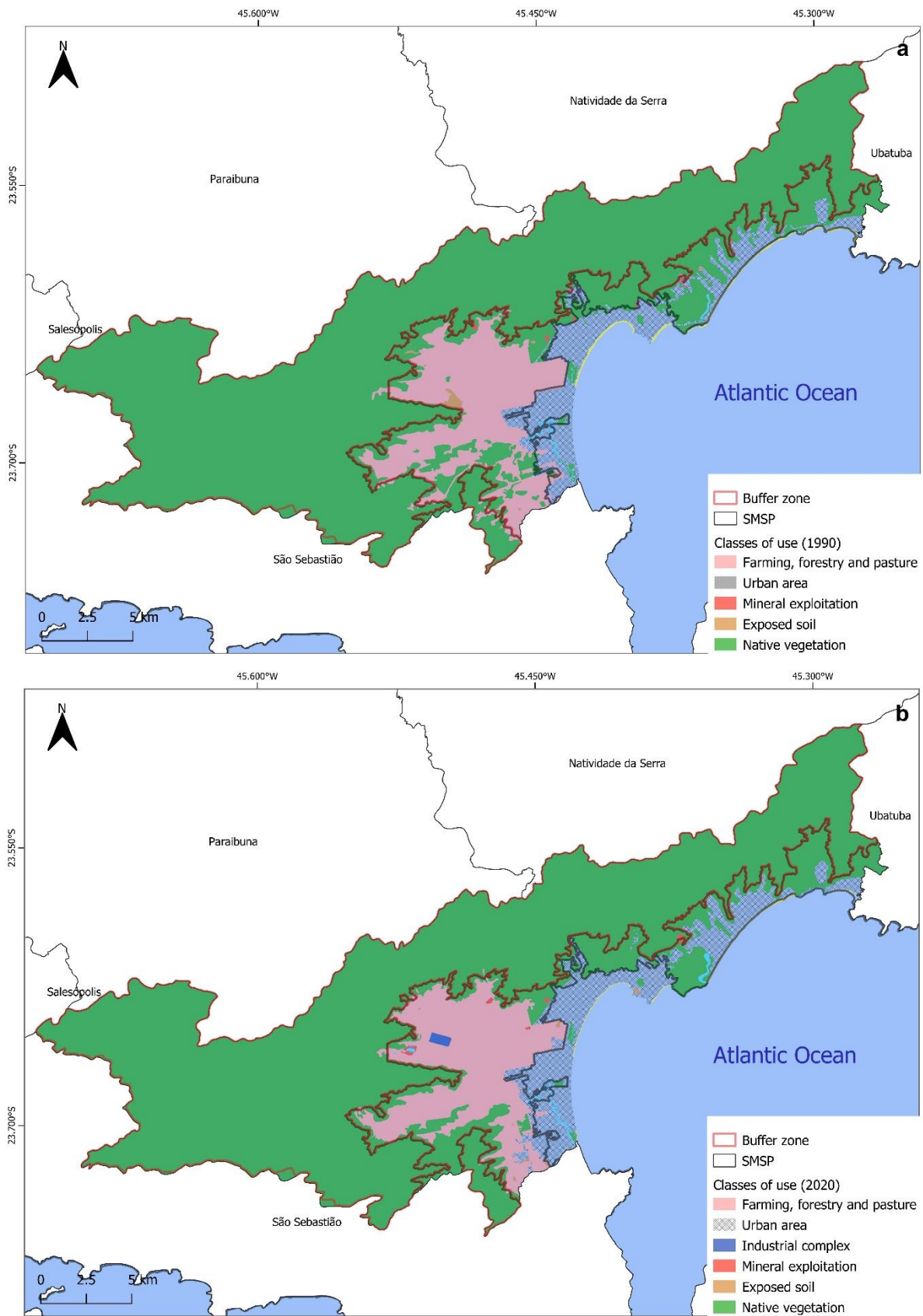


Figure 2 – Land use and occupation maps in Caraguatatuba (a) 1990 and (b) 2020. Adapted from Balaguer et al. (unpublished results).

Table 3 – Classes of land use and occupation by area in Caraguatatuba, where the signs + and – correspond to increase and decrease, respectively. Source: Adapted from Balaguer et al. (unpublished results).

Class of use and occupation	1990 Area (Km ²)	2020 Area (Km ²)	Change (Km ² / Area)
Native vegetation	386.34	379.43	(-) 6.91
Exposed soil	0.97	0.34	(-) 0.63
Urban area	36.55	42.59	(+) 6.04
Farming, forestry and pasture	59.35	58.97	(-) 0.38
Mineral extraction	0.38	0.67	(+) 0.29
Industrial complex	Absent	0.67	(+) 0.67

b) Quantification of ES provided by geodiversity. The quantification of the impacts to ES of geodiversity was carried out using the method developed by Reverte et al. (2020), which has three steps that correlation related matrices: (i) obtaining significance degree of the land use and occupation categories changes on the ES, (ii) the correlation of the land use and occupation categories with the ES and (iii) calculation of significance values per group (ecosystem functions) and relative significance of each ecosystem service, which allow evaluating the loss of ES provided by geodiversity due to anthropic activity.

5.4 Ecosystem services provided by geodiversity

Seventy six ES provided by geodiversity were identified in Caraguatatuba county (Table 4). They were distributed in regulation, supporting, provisioning, cultural and knowledge functions:

Table 4 – ES provided by geodiversity in Caraguatatuba (SP).

EGVs	Regulating	Supporting	Provisioning	Cultural	Knowledge
Rocks and structures	1. Drainage orientation. 2. Influence of rock fractures and foliations on landslides.	20. Support for builds.	35. Construction materials.	48. Tourism.	61. Research in Structural Geology. 62. Geosites. 63. Geodiversity sites.
Unconsolidated deposits	3. Erosion control. 4. Flood risk reduction. 5. Dissipation of energy from waves and tides. 6. Blue carbon sequestration. 7. Drainage guidance and flood control.	21. Support and maintenance for biodiversity. 22. Natural gas reservoir.	36. Food. 37. Handicraft. 38. Water catchment. 39. Construction material.	49. Tourism. 50. Poems. 51. Legends.	64. Geosites. 65. Educational kit. 66. Research in marine and fluvial terraces.
Forms of relief	8. Climate regulation. 9. Drainage guidance and flood control. 10. Erosive processes and landscape modification (landslides). 11. Coastal physiography in the interference of the morphodynamic state of beaches.	23. Support and maintenance for biodiversity. 24. Plain for urban occupation.	40. Food.	52. Tourism. 53. Religious practice in Morro Santo Antônio. 54. Sport. 55. Landforms Pedra da Freira, do Sapo e do Jacaré. 56. Poems. 57. Viewpoints.	67. Geosites. 68. Geodiversity sites. 69. Courses for environmental monitors. 70. School activities at SMSP. 71. Job. 72. Landslides in the Serra do Mar.

Mineral resources

25. Platform for processing Petrobras natural gas from the Mexilhões field.
26. Different types of aquifer.

41. Natural gas.
42. Construction materials.
43. Drink: mineral water.

73. Heavy minerals.
74. Environmental feasibility studies (Petrobras).

Soils

12. Soil properties influence the triggering of landslides.
13. Water regulation and quality.
14. Carbon sequestration.

27. Agriculture.
28. Pasture.
29. Support and maintenance for vegetation.
30. Spring protection.

44. Water reservoir.

75. Soils contribute to the triggering of landslides.

Water resources

15. Atmospheric circulation and masses control temperature and wind that will influence waves and coastal currents and sedimentary processes.
16. Short-term Sea level elevation (hangover) influences erosion.
17. Tidal dynamics.
18. Basins and flood control.
19. Blue carbon sequestration.

31. Inundation of the Massaguaçu River as a determinant for the distribution of floristic composition.
32. Transport and navigation.
33. Point to pier and port for residents.
34. Different types of aquifer.

45. Food: fish.
46. Drink: water catchment from the Rio Claro.
47. Sand exploitation.

58. Legends.
59. Leisure.
60. Juqueriquerê River: an economically strategic point in the 20th century.

76. Environmental monitoring and forecasting.

5.4.1 Regulating services

The Serra do Mar Mountain range (Fig. 3) is the main regional geomorphological feature of the area and contributes to climate/weather regulation, having influence on the precipitation regime - the so-called orographic rain. The effect of maritime and wind direction when added to atmospheric and ocean processes, such as the generation of winds the mountain range provides air condensation and precipitation at the oceanic slopes (Pellegatti e Galvani, 2010). When comparing two hydrographic basins in different conditions (one coastal and the other inland), Terassi e Galvani (2017) conclude that the oceanic slope of the Serra do Mar and the maritime guarantee a greater rainfall and erosivity than in the basins located in the shaded zone, after orographic feature, that affects water storage.

Due to the coastal dynamics of the area, the atmospheric, oceanic and terrestrial processes intertwine. The circulation of atmospheric masses control both temperature and wind, which influence the behavior of the climate waves that interfere in the coastal currents, acting on sedimentary processes such as erosion and deposition (Souza, 2005). As an oceanic process, the tidal regime is related to the gravitational attraction exerted by the sun and, mainly, by the moon. On the north coast of São Paulo state, this tidal regime is characterized by microtides with astronomical spring tides (< 2m), which influence currents generated by their action (Souza, 2005; Souza, 2012). According to Souza (2005), the sea level rise is associated with the intensity and the variation in atmospheric pressure. It is also related to cold fronts that cause hourly, daily and seasonal variations and that may be influenced by the El Niño/ENOS phenomenon, sunspots, in southeastern Brazil, and precipitation in the northeastern region of the country.

The coastal physiography interferes with the beach's morphodynamic state. On the northern coast of the São Paulo state, the beaches are indented, with larger inlets and smaller bays than those on the south. This causes changes both in the shape and the direction of the shoreline, which consequently orient the wave attack. In Caraguatatuba, the beaches show a morphodynamic state such as low-energy dissipative, reflective and high energy intermediate (Souza, 2012).

Barbier et al. (2011) identify services such as erosion control and sediment balance, coastal protection through wave energy dissipation, carbon sequestration, and water quality in unconsolidated deposits such as beaches and mangroves. Spodosols play an important role in preserving water quality in areas with a shallow water table in the latter.

Among the main common terrestrial processes are the landslides highlighted by the historical event of 1967, with debris flows associated with a high precipitation pattern (Cruz, 1990). Cerri et al. (2018, 2020) demonstrates that the phenomenon at Serra do Mar, were triggered and controlled by rock fractures and foliations, as well as physical properties of the soil (porosity, mineralogy, morphology and structure).

Another regulation service is associated with rock's hydrological behavior that controls drainage and flooding. According to Moura (2013), crystalline rocks are more impermeable than sedimentary ones, which facilitates surface runoff, channel formation and increased drainage density. The same happens with fractures and shear zones that control the drainage pattern, such as the Camburu shear zone (Mora et al., 2013). Several studies show morphometric parameters as indicators to understand the susceptibility of watersheds flooding to contribute to flood control, as is the case of the Juqueriquerê River Basin (Souza, 2005a; Moura, 2013). Boulomitys et al. (2014) agrees that factors such as shallow water table, impermeable sediments, silting of gutters and orographic rain as plausible parameters for the high morphometric susceptibility of the Juqueriquerê River Basin and the convex slopes and deforestation in the Claro River Basin, both in Caraguatatuba.

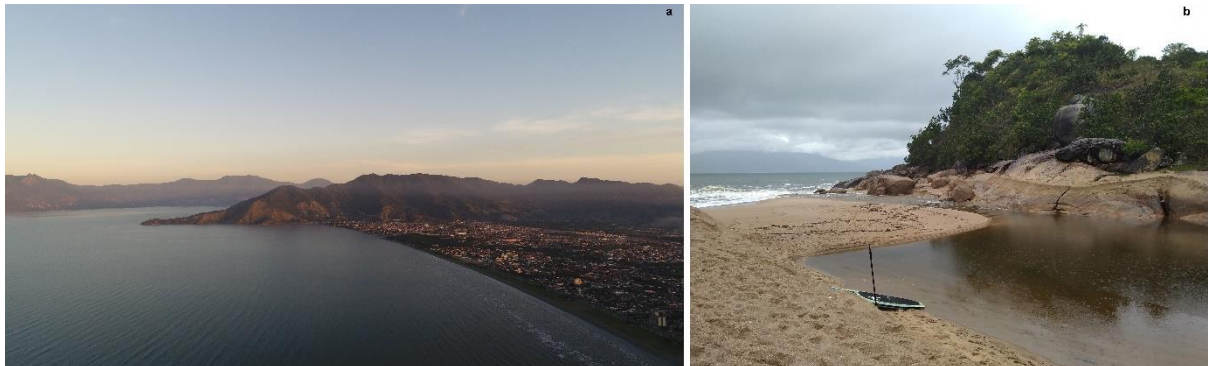


Figure 3 – (a) Serra do Mar seen from the Caraguatatuba plain (SP). (b) Lagoa Azul beach with an open channel to the mouth of the Capricórnio River representing the dynamics of erosive processes in these locations.

5.4.2 Supporting services

The Quaternary units and the Serra do Mar slopes provide support and maintenance for several vegetation types, characteristic of the coastal area of Caraguatatuba (Fig. 4). These include the vegetation on the beach and dunes, scrub, inter-cordon vegetation, low restinga forest, swamp restinga, high restinga forest, swamp forest, restinga-hillside transition forest and dense rainforest (Souza and Luna, 2008).



Figure 4 – Vegetation support (a) Beach vegetation and (b) High resting forest vegetation, highlighted below the yellow dashed line, and dense rain forest vegetation above the line. At the Lagoa Azul Beach.

The existing soils in the area fulfill particular ecosystem functions, such as lithalic neosols (which protect the springs at the top of the Serra do Mar), the gleysols (which sustain the swampy vegetation and the hygrophilous filed) and the cambisols (suitable for agricultural activities). Regarding the agricultural activities, Lima (2018) mentions family farming in the proximity of the Rio Claro and Massaguaçu neighborhoods, where products such as aubergine, bananas, corn, manioc, ginger, cucumber, bellpepper, palm heart, sugar cane, coffee, coconut, jiló, chicory and beans (where crops have been handled since the 1970s by local caiçaras as pointed out by Paes (1998).

The pasture occupies a significant sector of the local economy represented by cattle, buffaloes and pigs breeding (Lima, 2015). More recently, the forestry can be also seen in satellite images as an existing service in the county.

The geodiversity elements are responsible for providing habitats for several species, such as mangroves, rivers and beaches. This relationship has been explored by several authors, such as Matsumoto (2008), which correlates the flooding depth in the Massaguaçu River to the floristic distribution and concludes that the first physical factor is determinant for the occurrence of flora composition. Another example is the relief pattern and the unconsolidated deposits as relevant elements for the maintenance of two types of starfish (*Echinodermata* e *Asteroidea*) and the *Tivela* mollusc in Caraguatatuba bay (Turra et al., 2019; Turra et al., 2014). The mangrove-type unconsolidated deposits are also strategic places for feeding and breeding of a diversity of bird species, as exemplified in Favoretti e Batalla (2017) for the Juqueriquerê River mangrove.

Geodiversity as a platform for human activities is extremely important in coastal areas, as observed throughout Brazil's colonization history. Geodiversity is being explored in this area

as infrastructure for urban and economic development. As an example, there is the urban occupation adjacent to the Caraguatatuba coast as a platform for processing natural gas (Cora, 2011), the navigation and transport in the watercourses (Paes, 1998) and, more recently, the duplication and bypass of the Tamoios highway. The region's igneous and metamorphic rocks and coastal sediments provide water storage in both crystalline and coastal aquifers, as well as natural gas and carbon sequestration in sediments and soils (Bruce et al., 1999).

5.4.3 Provisioning services

The provision function involves ecosystem services offered by geodiversity that directly benefit human beings. Among them, there is the direct provision of food through the mangrove. Paes (1998) mentions the collection of crabs, caimu and oyster by residents of the county and Turra et al. (2014) highlight how the collection of *Tivela* molluscs affects the population density of these species on the Caraguatatuba beaches.

In addition to the different aquifer types, the mineral water provision in the county is made through direct catchment from the Claro River, which belongs to the Juqueriquerê River Basin (Fig. 5). According to Boulomitys et al. (2014), in 2013 the river was responsible for supplying water for about 60% of the central area of Caraguatatuba and the north coast of São Sebastião.

In addition to the renewable resources, geodiversity also provides non-renewable resources. According to the National Mining Agency (ANM, 2020), Caraguatatuba exploits sand and foundry sand, many coming from the Juqueriquerê River, as well mineral water, gneisses, granites and gravel (civil construction and ornamental use). At the coastal plain the natural gas treatment unit is located, managed by a Petrobras enterprise that processes natural gas from the Mexilhão field, in the Santos Basin, and obtains natural gas, liquefied petroleum gas (cooking gas) and C⁵⁺ gas (condensate) (Secron et al., 2008).

Another importante service refers to handcrafted products made from geodiversity elements or products that need it as a means of subsistence, such as mangrove guanxuma, used as a raw material in the manufacture of mats (Paes, 1998). As a result of these products, the Terramar Artesanal Ceramics is a route point destined to local ceramists, in the Porto Novo beach (Arruda, 2017).

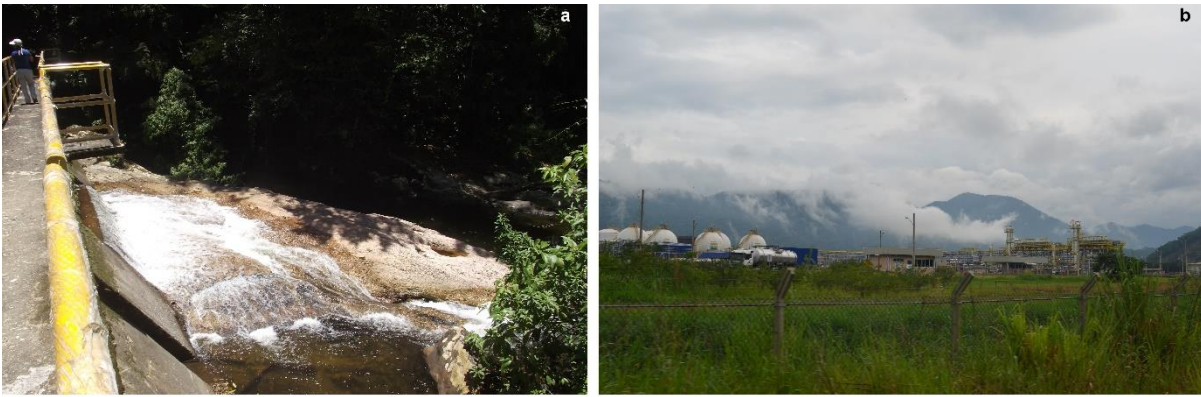


Figure 5 – provisioning services (a) Water catchment from the Rio Claro, Juqueriquerê River Basin and (b) Natural gas treatment unit, coastal plain. Photos: Karlla Arruda.

5.4.4 Cultural services

The cultural services are related to the appropriation of local geodiversity by society (Gray, 2013). In Caraguatatuba there are many legends associated with the caiçara community that refer indirectly to respect and conservation of geodiversity (Paes, 1998). Examples of them are the “Pora” and the “Capora”, associated with the river. In the caiçara imaginary, the Pora boy was the guardian of the Juqueriquerê River and the fish that live in it, so that residents and visitors respect the river, while the Caipora guaranteed the care of the forest in the same river (Paes, 1998; FUNDAC, 2001).

Historic aspects involve the existence of the “Fazenda dos Ingleses”, a British Company (The Lancashire General Investments Company) established in 1927 and closed in 1967, after the catastrophe that occurred in Caraguatatuba (Lima e Oliveira; Paes, 1998). The company, which played an important role in the local economy due to the export of agricultural products such as bananas and oranges, used the Juqueriquerê River to transport products, also providing navigation services (Paes, 1998).

Geodiversity also provides leisure activities that refer to how caiçara children played and learned about fishing (Paes, 1998) and to tourists that look for trails on beaches, waterfalls, viewpoints (Fig. 6) and trips to the SMSP, free flight practices in the Santo Antônio Hill (Arruda, 2017), and geoturistic routes (<https://www.caragua.tur.br/atrativos-turisticos/geoturismo/>). Field visits are also common in undergraduate courses and basic levels of education (Garcia et al., 2019).

Of the artistic inspirations, many are related to the beaches landscapes, which were the focus of several poems that even have symbolic representations of some rocky shore geofoms, such as Pedra do Jacaré, Sapo and Freira, the last one being associated with a legend disseminated even today by the county’s residents.



Figure 6 – Cultural services (a) View from the Tropeiros viewpoint and (b) Pedra da Freira on the coastal plain.

5.4.5 Knowledge services

Knowledge services relate to how geodiversity is used for the recognition of Earth history and regional geology, as laboratory for scientific research, classes and other educational purposes, as well as monitoring and the forecasting of natural phenomena, job creation and geoforensics.

Geodiversity is the base for the recognized places of geological interests (PIGs) namely geosites and geodiversity sites that encompass Geoconservation actions ranging from conservation to dissemination of these places for education and tourism (Brilha, 2016). In this sense, the county has inventories of PIGs that record the regional geological history from the Proterozoic through the opening of the South Atlantic, in the Cretaceous, the formation of the Serra do Mar and the changes in sea level (Garcia et al., 2019). These locations have been used in higher education classes, courses and environmental monitors at protected areas (Garcia et al., 2019).

Key geological research sites are also found in the study area. Examples of these sites are the Camburu shear zone (Mora et. al., 2013), the Embu and Costeiro domains (Meira, 2014) and the past beach and fluvial environments, such as Pleistocene marine and fluvial terraces (Souza, 1992), including unique specimens in the Caraguatatuba coastal plain.

Educational material in Geosciences, such as the educational kit “From rock to grain” (Bourotte et al., 2014) (Fig. B), interpretative panels (Fig. 7A), geoturistic routes (<https://www.caragua.tur.br/atrativos-turisticos/geoturismo/>) and guided school visits to the SMSP are also examples of knowledge services provided in the region.

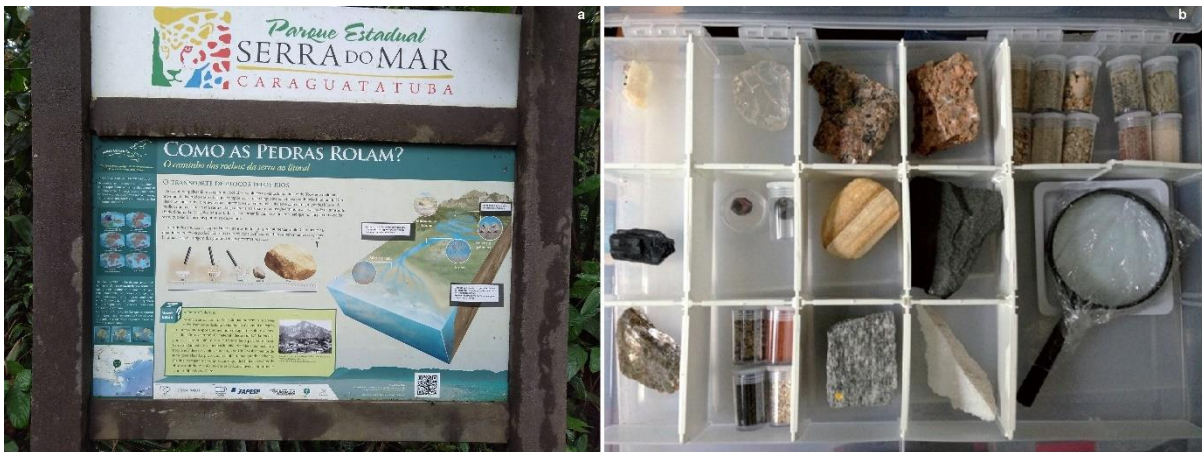


Figure 7 – Knowledge services. (a) Interpretative panel on SMSP and (b) Educational kit. Source: Bourotte et al. (2014).

Another relevant aspect provided by the local geodiversity refers to environmental monitoring and forecasts, many of them associated with the water resources in hydrographic basins such as the Juqueriquerê River, the largest at the northern coast of the São Paulo state. There are several studies aiming the methodologies that allow the assessment of river flows (Boulomitys et al., 2014), flood phenomena (Souza, 2005; Silva et al., 2016; Boulomitys et al., 2017; Okida e Veneziani, 1998; Boulomitys et al., 2014a) and water quality comparison in estuaries (Carvalho et al., 2013). Monitoring of geomorphological processes of landslides in the Serra do Mar were carried out, highlighting the pioneering works by Cerri et al (2019; 2020) in the county. Heavy minerals have also been described in the Caraguatatuba bay (Corrêa and Elias, 2001).

In addition, the Petrobras natural gas processing infrastructure and its operation boost in the local economy generating a lot of jobs which in 2016 had a staff of 920 professionals (<https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/unidade-de-caraguatatuba-completa-5-anos-com-marca-historica-de-producao-de-gas.htm>) is also an important aspect.

5.5 Assessment of the losses in es provided by geodiversity

The degree of significance by land use and occupation in the Caraguatatuba resulted in low, medium and high values (Table 5). It is important to highlight that the degree of significance with high values represents categories with greater impacts in the studied area. In this case, it indicated the urban area and native vegetation due to regional coverage with extensive area in km² (table 3) and average magnitudes for the urban area and large for native vegetation, as the Atlantic Forest stretches across southeastern Brazil.

Table 5 – Matrix A - Significance classification in Caraguatatuba (SP).

Land use categories	Coverage	Magnitude	Reversal factor	Significance
	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)
Urban area	2	2	3	7
Native vegetation	2	3	2	7
Exposed soil	1	1	1	3
Mineral extraction	1	1	2	4
Farming, forestry and pasture	2	2	1	5
Industrial complex	1	1	2	4

For the correlation of land use and occupation categories with ecosystem services (Table 6), values from 1 to 3 were assigned. The minimum value (1) was considered for services that do not exist in the region, corresponding to industrial minerals, fossils, nutrients and minerals for healthy growth and geoforensic. The categories that obtained the highest attributed values were urban area and native vegetation, which obtained high significance.

Table 6 – Matrix B - Correlation of land use and occupation classes with ecosystem functions. 1 = not a relevant relationship; 2 = indirect relationship; 3 = direct relationship.

Functions	Services	Land use and occupation categories					
		Urban area	Native vegetation	Exposed soil	Mineral extraction	Farming, forestry and pasture	Industrial complex
Regulating	Atmospheric and ocean processes	1	1	1	1	2	2
	Terrestrial processes	3	3	3	2	2	2
	Flood regulation	3	3	3	3	2	1
	Water quality regulation	3	3	3	2	3	2
Supporting	Soil processes	3	3	3	1	3	1
	Habitat provision	3	3	2	2	3	1
	Land and water as platforms for human activity	3	3	1	1	2	2
	Burial and storage	3	3	3	3	2	1
Provisioning	Food and drink	3	2	2	2	3	1
	Nutrients and minerals for healthy growth	1	1	1	1	1	1
	Energy	3	1	1	3	1	3
	Construction materials	3	1	1	3	1	1
	Industrial minerals	1	1	1	1	1	1
	Ornamental products	1	3	1	1	1	1
	Fossils for sale	1	1	1	1	1	1
Cultural	Environmental quality	3	3	1	2	1	2
	Geotourism and leisure	3	3	1	1	1	1
	Cultural, spiritual and historic associations	3	3	1	1	1	1

	Artistic inspiration	3	3	1	1	1	1
	Social development	3	3	1	2	1	1
	Earth history	3	1	1	3	1	3
	History of research	3	2	1	1	1	1
Knowledge	Environmental monitoring and forecasting	3	3	1	1	1	1
	Geoforensics	1	1	1	1	1	1
	Education and employment	2	2	1	3	1	1

The impact percentage of land use and occupation categories in relation to functions (group significance) and ecosystem services (relative significance) is shown in table 7. The supporting function was the most affected by the land use categories, with a significance of 50,9% per group. In this function, the impacts are more significant for storage and burial services with a relative significance of 53,5%, especially considering that the crystalline and coastal aquifers can be affected by most categories, which pose a threat to the reservoirs and its exposure to pollution. Following this service, the provision of habitats is also in check (52,1%) since coastal environments provide resources for the reproduction and maintenance of species diversity of fauna and flora.

The second most threatened function is the regulating, with a 47,7% significance per group. The water quality regulation services present 56,9%, which can be compromised by inadequate management of land use, mainly due to urbanization, lack of vegetation, agriculture, pasture and forestry and exposed soil that favor the pollution of water resources. This is the reason whereby all categories received at least indirect correlation (value 2) with the services. Other services, such as terrestrial processes and flood regulation, resulted in 53,5% by the strong influence of urbanization, native vegetation and exposed soil categories. The atmospheric and oceanic processes were the least affected, with 27,1%, as a result of the characteristics of the services identified, for example, to the orographic feature of the Serra do Mar.

The cultural function had 41,9% significance per group. This result is related to how the categories of urban area and native vegetation have a direct influence in services that offer therapeutic landscapes, geotourism on beaches and in the protected area, cultural associations in landforms and poems. This influence occurs especially on scenic beauty and on the destruction of culturally relevant places. Among the services of this ecosystem function, the most affected were environmental quality, with 45,8% of relative significance, social development, with 43,1% and the others with 40,3%.

Table 7 – Matrix C - Relative significance by ecosystem services and functions.

Functions	Services	Land use and occupation categories						SUM	Relative significance per ES	Significance per group of ES
		Classification of the Significance of the natural environmental change by elements associated to land use and occupation categories								
		Urban area	Native vegetation	Exposed soil	Mineral extraction	Farming, forestry and pasture	Industrial complex			
		7	7	3	4	5	4			
Regulating	Atmospheric and ocean processes	7	7	3	4	10	8	39	27,1%	47,7%
	Terrestrial processes	21	21	9	8	10	8	77	53,5%	
	Flood regulation	21	21	9	12	10	4	77	53,5%	
	Water quality regulation	21	21	9	8	15	8	82	56,9%	
Supporting	Soil processes	21	21	9	4	15	4	74	51,4%	50,9%
	Habitat provision	21	21	6	8	15	4	75	52,1%	
	Land and water as platforms for human activity	21	21	3	4	10	8	67	46,5%	
	Burial and storage	21	21	9	12	10	4	77	53,5%	
Provisioning	Food and drink	21	14	6	8	15	4	68	47,2%	31,2%
	Nutrients and minerals for healthy growth	7	7	3	4	5	4	30	20,8%	
	Energy	21	7	3	12	5	12	60	41,7%	
	Construction materials	21	7	3	12	5	4	52	36,1%	
	Industrial minerals	7	7	3	4	5	4	30	20,8%	

	Ornamental products	7	21	3	4	5	4	44	30,6%	
	Fossils for sale	7	7	3	4	5	4	30	20,8%	
	Environmental quality	21	21	3	8	5	8	66	45,8%	
	Geotourism and leisure	21	21	3	4	5	4	58	40,3%	
Cultural	Cultural, spiritual and historic associations	21	21	3	4	5	4	58	40,3%	41,9%
	Artistic inspiration	21	21	3	4	5	4	58	40,3%	
	Social development	21	21	3	8	5	4	62	43,1 %	
	Earth history	21	7	3	12	5	12	60	41,7%	
	History of research	21	14	3	4	5	4	51	35,4%	
Knowledge	Environmental monitoring and forecasting	21	21	3	4	5	4	58	40,3%	34,9%
	Geoforensics	7	7	3	4	5	4	30	20,8%	
	Education and employment	14	14	3	12	5	4	52	36,1%	

The least affected Ecosystem functions are knowledge and provision. With a group significance of 34,9%, the services with the greatest threat are, respectively, the history of the Earth (41,7% of relative significance), environmental monitoring and forecasting (40,3%), in addition to education and employment (36,1%). For the second function it has the lowest significance by group, with 31,2%, with greater impacts on food and drink services (47,2%), energy (41,7%) and construction materials (36,1%).

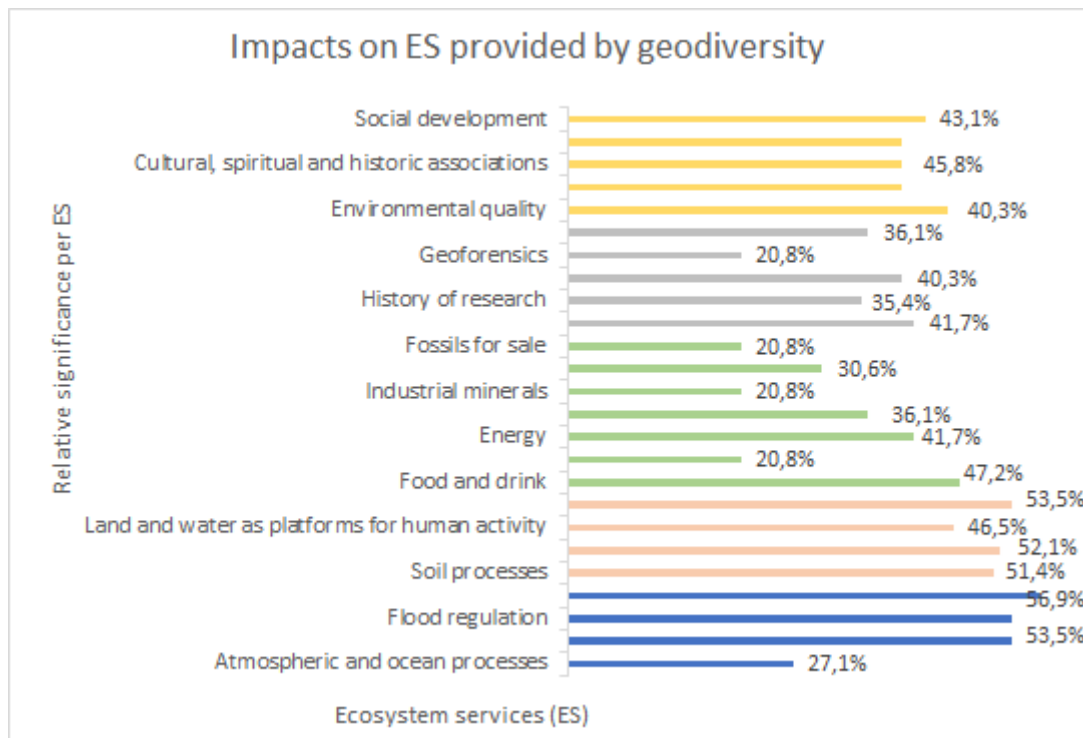
5.6 Discussion

5.6.1 Impacts to ES provided by geodiversity and implications of the method

The land use and occupation categories with the greatest impact on all evaluated ecosystem functions are urban area and native vegetation, since as the former expands, the latter is gradually suppressed (Fig. 2). Urban growth in the municipality was triggered by the Rio-Santos and the Tamoios highways construction in the 1960s and 1970s, which facilitated the flow of goods and transit of tourists (Pereira, 2017). However, it was in the 80s and 90s that urbanization was boosted due to mass tourism and real estate speculation (Gigliotti and Santos, 2013).

Satellite images from 1975 show the appearance of urban agglomerations in the northernmost portion of the area, within the Indaiá, Centro, Martin de Sá and Massaguaçu neighborhoods. According to Rosembach (2013), the population density and absolute size data in the county in 2010 indicated the region as fragile and transitional. Today the estimated population of Caraguatatuba is 125,194 inhabitants (IBGE, 2021) and there is an urban area along the shore and at the center with clusters on the slopes of Serra do Mar, vulnerable to natural processes.

The vector of urban area affects the supporting ecosystem function (50.9% of group significance) due to its interference in the intense hydrological dynamics of superficial and underground processes in the coastal area (Graph 1). Among the storage and burial services, with 53.5% of significance, the coastal aquifer stands out, with an extension of 4,600 km² along the São Paulo coast, bordering the crystalline aquifer. Although its reservoir productivity flows below 10m³/h per well, it supplies São Paulo coastline, including Caraguatatuba (São Paulo, 2012), and could be highly affected if the impact pattern is maintained.



Graph 1 – Relative percentage of impact of land use and occupation categories on cultural ecosystem services (yellow), knowledge (gray), provisioning (green), supporting (pink) and regulating (blue).

Reservoirs are doubly threatened by the growth of urban areas and the absence of native vegetation, as they depend on the permeability, coverage and thickness of soils. In addition, the marine, fluvial and mangroves sediments that regulate water quality, create a service with a high percentage of relative significance (56.9%). Exposed soils also interfere in the provision of this service, since the absence of natural filters facilitates the pollution of shallow soils (such as spodosols) and reduces the protection of groundwater, impacting the offer of this service.

Human impacts on groundwater are classified as urban, rural and mining activities (São Paulo, 2012). According to Freire e Batalla (2018), the Camaroeiro mangrove has been disturbed as a result of urban impacts such as deforestation, landfill, domestic effluents and garbage. This is the case with the mangroves and Juqueriquerê river, the largest navigable river on the north coast of the state of São Paulo. Its mangrove was landfilled by virtue of real estate speculation and mass tourism and it has irregular occupations, contamination of sewage, ship washing products (Paes, 1998; Favoretti and Batalla, 2017) and sand extraction (Fig. 8). All these impact the habitat provision service (52.1% of relative significance) that supports several species of avifauna (Favoretti and Batalla, 2017).

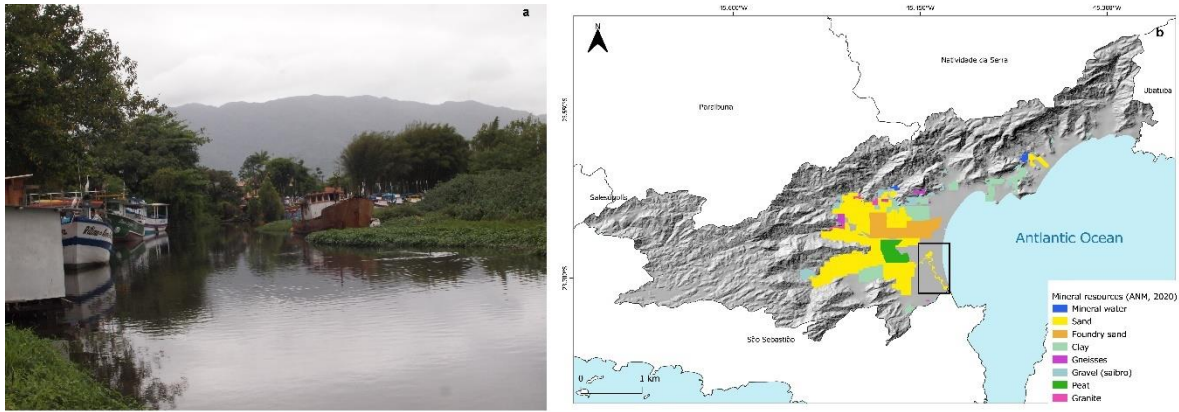


Figure 8 – Juqueriquerê River (a) Boats parked on the river and (b) Mineral resources map based on potential use. Highlighted in black for the river with potential use of sand for civil construction.

In addition to the natural factors of hydrological dynamics, changes in land use alter the regulation of flooding process in hydrographic basins, which obtained a relative significance of 53.5% (Graph 1). This is the case with deforestation, which increases runoff in the headwaters and slopes during the rainy seasons, and with the urban area, which raises the risk of flood by disposing of household waste in riverbeds.

The report of the Intergovernmental Panel on Climate Change points out that urban areas contribute to altering the hydrological cycle, increasing the level of precipitation and runoff. It has contributed, at least locally, to warming, with an increase of 0.21°C in São Paulo from 1950 to 2018. Coastal areas, with rising sea levels, will have consequences for increased flooding and air temperature in cities (IPCC, 2021).

Although mining has a punctual and little relevance as an impact on the ES, it can interfere with the flooding of the Juqueriquerê River Basin, which is located in a Permanent Protected Area (PPA) (Okida and Veneziani, 1998). In PPAs, land use is often conflicting, as mining is a recurrent impact these areas of the country, as seen in Juliano et al. (2009), Silva et al. (2010), Araújo et al. (2013) and Reverte et al. (2020). As an alternative, Marnika et al. (2015) developed a system of indicators for mining in PAs for sustainable development and maintenance of ES that could be applied to PPA in Brazil.

Urbanization and native vegetation have a significant impact on cultural function. This is due to the services' characteristics which rely on the lowest possible visual impact, a threat described by Gray (2013). With 45.8% of relative significance (Graph 1), environmental quality was the most affected service, with examples of mining along highways and at the Camaroeiro viewpoint (Fig. 9). Despite the lack of maintenance that precede Covid-19 pandemic and the absence of interpretive panels, their perspective allows us to visualize the pattern of occupation on the plains with discrete appearances on the slopes, which are threatened by landslides. There

are high-end houses on rocky shores, such as the one at Tabatinga beach, that will be vulnerable to the gradual rise in sea level.



Figure 9 – Example of geomorphology featureless by mining. View from the Camaroeiro viewpoint.

From the ecosystem function of knowledge, the most harmed service is Earth history, which involves the geological heritage. According to Mazzucato and Bacci (2020) and Mazzucato et al. (unpublished results), in coastal zones, the geomorphological sites are paleoenvironmental records that allow the construction of future scenarios. Two of them, inventoried by Garcia et al. (2019), are already threatened by the ZEE (2017). The Pleistocene marine terraces described by Souza (1992) are the only examples in the city that were destroyed by urbanization and represent a loss of geological record and potential educational resources. Although there are threats to geodiversity, it should be noted that some anthropic activities, such as those at Massaguaçu Quarry (Garcia et al., 2019), allow the exposure of previously inaccessible materials.

According Higa and Garcia (2021), threats and losses to geological heritage occur as result of a lack of inspection, government participation in conservation and specific laws for the abiotic portions, making it difficult for the general public to understand the matter. Although there are environmental legislations indirectly applicable to geodiversity and geological heritage, the authors emphasize the importance of approach conservation in territorial management from a broad perspective that is not limited to just a few types of geodiversity.

The provisioning function had a lower percentage, but the food and drink services reached 47.2% of relative significance due to the vulnerability that the urbanization and the

absence of native vegetation imply in the water reservoirs. Due to the size, type of activity, and distribution of the other land use and occupation categories, they had a lower impact on the ES. Categories with smaller and more punctual areas, such as exposed soil and mining, had a lower overall impact, particularly the first. The soil, on the other hand, plays an important role in carbon capture and storage.

Soil, as one of the largest sources of organic carbon storage, helps to regulate greenhouse gasses and climate change (Bruce, 1999) and when exposed, facilitates erosive processes, making carbon sequestration more difficult. Regarding this, there has been a significant reduction of 0.63 km² in recent years (table 5). Agricultural and pasture activities also interfere in this process, but both can be mitigated. Soil carbon losses and changes are greatest during the first years of agricultural cultivation, but they tend to stabilize over time and carbon sequestration resumes (Bruce et al., 1999). Aquatic ecosystems, such as mangroves and marine organisms play a role in the capture of blue carbon, which is stored in unconsolidated sediments, and thus contribute to carbon capture (Nelleman et al., 2009).

Agriculture, pasture and forestry, which were grouped based on the mapping scale, had little significant impact on most ES provided by geodiversity due to the reversibility of its effects, which can be mitigated in the presented context.

Concerning the methodology used, the defined parameters for the degree of significance classification are essential for quantifying the impacts on ES provided by geodiversity, as they indicate the categories of land use and occupation that have the greatest impact on each ecosystem function in the studied area. This reveals a consistent approach with the intrinsic issues of the region where the application is carried out, which considers different economic and land use realities. The method was mentioned in several works, such as Pan et al. (2020) to transitional zone of three natural areas region, Gordon et al. (2021) to geoconservation actions in Protected Areas (PAs) and Garcia et al. (2022) to different forms to protect important sites and ES provided by geodiversity.

The method allows for adaptations in the assessment of different ES classifications provided by geodiversity, which was tested in the current work using Gray's (2013) classification, which considers five ecosystem functions instead of four. There is also the possibility of evaluating the impacts of land use on each identified ES rather than just on ecosystem functions, which can ensure greater detail of the impacts even if the assessment carries some subjectivity, such as the correlation of ecosystem functions with the categories of land use and occupation. Another positive aspect observed is the possibility of making projections for future scenarios based on current data.

Comparing the obtained results of this work and in Reverte et al. (2020) there is similarity in the low impacts to provisioning ecosystem function. This is due to the greater number of parameters, as pointed out by the authors and, indirectly, by the characteristics of the identified services and their tenuous connection with the categories of land use, except when considering the provision of food and drink, which are the most affected by the provision function.

5.6.2 Implications to geoconservation in protected areas

According to the IUCN's Protected Areas Management Manual (Crofts et al., 2020), PAs are divided into 6 categories (Crofts et al., 2015). Among them, the study area is the National Park, which in Brazil refers to strict protection, which only allows the indirect use of natural resources in a delimited area. This involves the management plan that includes measures that integrate the economic and social life of the surrounding community (NSPA 9985/2000), including the maintenance of ES, allowing the approach to be tested and implemented in these areas.

This area in Brazil contains Buffer Zone (BZ), a legal provision defined as the area surrounding the conservation units, which anthropic activities are subject to restrictions to minimize negative impacts on the PA and consequently on ES (Villani, 2007). However, practical application of BZ is in conflict with economic interests and urban growth. According to the most recent Ecological Economic Zoning (2017), industrial undertakings such as the Petrobras gas treatment unit's pipelines can be found in the area. Although it is an ES support area, it also prohibits other direct uses in the area. In the last three decades, the county's urban area has grown by 6.04 km², reaching the BZ, which shows houses along the rivers, indicating the marginalization of this population and possibly the eviction of household waste. As a result, it's a complicated subject to be studied.

Urbanization and industrialization are common threats in the other PAs and natural areas around the world (Garima and Chandra, 2017; Pan et al., 2020) and as a result, they become challenges to be faced in the maintenance of ES in these areas. The ES is an approach based on the balance between the economic, environmental and ecological sectors and evaluating the geodiversity of PAs through this perspective is a useful tool, especially for geoconservation.

It is important to highlight that the ecosystem maintenance occurs through the participation of both living and nonliving portions. Therefore, approaching ES from the perspective of geodiversity is critical to improving nature conservation strategies, because geodiversity is neglected in ES classification and action plans in PAs resulting in decision-

makers' lack of knowledge of the direct and indirect benefits of geodiversity (Gray, 2012; Fox, 2020). However, Crofts (2019) states that this scenario is changing, owing primarily to IUCN-led geoconservation initiatives, and Mucivuna et al. (2021) claims that geoconservation research in Brazilian national parks has grown over the years.

Geodiversity's ES have been evaluated at different scales and have applications in holistic and sustainable nature management in PAs. There are works that point to contributions to geoconservation in coastal areas (Garcia, 2019), impact of climate change on ES (Steiner et al., 2021), geoparks (Silva and Nascimento, 2021; Perotti et al., 2021) and natural areas (Tognetto et al., 2021). Tognetto et al. (2021)'s work is especially relevant in areas with geomorphological prominence, as it considers topography as the basis for geosystem service maps. Alahuhta et al. (2018) address ES mapping as well.

Furthermore, because geodiversity is the substrate for the existence and distribution of fauna and flora species, the ES approach provided by geodiversity indirectly contributes to the conservation of biodiversity in the PAs. Gray (2021) supports this by pointing out the theme as early as the 1970s and, more recently, with works such as those by Brazier et al. (2012), Hjort et al. (2015), Chakraborty (2020) among others. However, this is not the case because geodiversity exists independently of biodiversity (Gray, 2013; Fox et al., 2020), which does not mean that it is not under threat as well. In this regard, Gray (2013) identifies several anthropic and natural threats to geodiversity, demystifying the idea that abiotic portions are not vulnerable.

One step in geoconservation in PAs is the analysis of threats in order to prioritize conservation and ensure the preservation of cultural, functional, educational, aesthetics and tourism values of geodiversity (Gordon and Barron, 2012; Gordon, 2019; Crofts et al., 2021; Gordon et al., 2021). Alternatively, Haines and Potschin (2013) presents a pressure box including natural and anthropogenic threats to ES, which can be adapted to geodiversity and its particularities of the threat type and the time scale on a renewable and non-renewable resources (Gray, 2018; Fox et al., 2020). Geoinicators are defined as measurements of geological processes and phenomena that occur over 100 years or less and that can indicate rapid environmental changes (Berger and Iams, 1996). They are used for geodiversity monitoring and have been used to monitor geosites in PAs in Spain (Vegas et al., 2015; Carcavilla et al., 2019).

5.7 Final remarks

The loss assessment in ES was effective in understanding which anthropic activities are endangering the goods and services provided by geodiversity and which are having the greatest impact. The results indicate that the supporting and regulating functions, such as aquifers, fauna and flora habitats and carbon sequestration and storage, are the ones that require the most effective environmental impact mitigation measures. The interaction of economic activities and the physical environment in the region is complex, especially in the BZs that are vulnerable to industrial activities and urbanization which, while minor, pose a future threat.

In this context, the methodological tool used contributes to geoconservation, primarily integrating threats from around the PAs. The assessment of impacts to ES provided by geodiversity developed by Reverte et al. (2020) is one of the thirteen objectives of the NSPA in Brazil, and it is part of the development and enhancement promotion of the conservation practices in PA.

Furthermore, the data obtained in this work can be used to perform projections with a special focus on urban areas and native vegetation categories, which can be presented to the county's stakeholders to raise awareness of the benefits provided by geodiversity and the consequences of its losses. The data have clarified relevant issues in the scenario of ecosystem services loss in coastal areas, and they contribute to improvements in environmental legal provisions, and the well-being of the local population and tourists.

In light of this, the approach's potential use as a planning and territorial management tool for the selection of priority areas in conservation strategies, valorization and projections, all of which are important for achieving sustainable development, is highlighted. The tool can be implemented by public and private institutions to quantitatively assess the environmental viability of intended projects, as well as monitor ongoing environmental strategies and establish environmental solutions tailored to local needs.

Based on these findings and the significance of the ES, as well as on the reduction of threats to geodiversity and the human being, some global initiatives are proposed that cover the diagnostic, conservation, and promotion sets applicable in different areas:

- i) encouragement of studies that integrate geodiversity to ES, given their undeniable contribution, with the goal of pressuring international institutions to joined abiotic portions in this context, such as those incentivize by IUCN;
- ii) promotion of courses for environmental monitors in order to incorporate geodiversity into activities promoted by protected areas, such as various parks, geological parks and geoparks under the auspices of UNESCO;

- iii) discussion of the subject with residents of the surroundings of PAs and promotion courses, including those for the teachers in the area where the methodology is used.
- iv) proposition of interpretative ES panels at strategic and representative areas,
- v) beyond academic work, the methodology will be presented to administrative sectors such as tourism, river basin committees, and industry in order to encourage its use and promote more sustainable practices.

Funding

This work was supported by the Sao Paulo Research Support Foundation (FAPESP) [process 2019/19527-5], and by the National Council for Technological and Scientific Development (CNPq) [process 130693/2020] (Master's scholarship). M.G. Garcia thanks the CNPq [Grant 309964/2018-0].

Author contributions

Laura Pereira Balaguer: Conceptualization, Methodology, Data curation, Formal analysis, Visualization, Investigation and Writing – original draft, Writing - Review and Editing. **Maria da Glória Motta Garcia:** Conceptualization, Methodology, Supervision, Investigation, Writing - Review and Editing, Project administration, Resources. **Fernanda Coyado Reverte:** Conceptualization, Methodology, Data curation, Formal analysis, Validation, Writing - Review and Editing, Resources. **Lígia Maria de Almeida Leite Ribeiro:** Conceptualization, Methodology, Investigation, Supervision, Writing - Review and Editing.

References

- Alahuhta J., Ala-Hulkko T., Tukiainen H., Purola L., Akujärvi A., Lampinen R., & Hjort J., 2018, The role of geodiversity in providing ecosystem services at broad scales: Ecological Indicators, 91:47-56, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.068>.
- Almeida F.F.M. de, 1964, Geologia do estado de São Paulo: Boletim, n. 41.
- ANM, 2020, <http://sigmine.dnpm.gov.br/webmap/>.
- Arruda, K. E. C., 2017, A Geoconservação como subsídio à gestão territorial sustentável: o mapa geoturístico do litoral norte do estado de São Paulo [Tese de doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 10.11606/T.44.2018.tde-26042018-091309.
- Balaguer, L.P., Garcia, M.G.M., Ribeiro, L.M.A.L., Combined assessment of geodiversity as a tool to territorial management: application to Southeastern coast of State of São Paulo, Brazil: Geoh Heritage. (Unpublised results).
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., Silliman, B. R., 2011, The value of estuarine and coastal ecosystem services: Ecological monographs, 81(2), 169-193, <https://doi.org/10.1890/10-1510.1>.
- Barros, F.L., Mansur, K.L., 2018, Desafios da gestão costeira integrada da Região dos Lagos

- (RJ): uma análise baseada na vulnerabilidade costeira e nos serviços ecossistêmicos da geodiversidade: *Revista Brasileira de Geografia*, 63(1), 73-97, https://doi.org/10.21579/issn.2526-0375_2018_n1_p73-97.
- Bastos Araújo, A.B., Medeiros, D.D.S., Hasenack, H., Azevedo, L.S., Fitz, P.R., Waskow, R.P., Kautzmann, R.M., 2013, Contribuição à Gestão Ambiental da Extração de Basalto em Nova Prata, RS: Mapas de APPs e mineração, <http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.22.34.34/doc/p0116.pdf>.
- Berger, A. R.; Iams, W. J. (eds.), 1996, *Geoindicators. Assessing Rapid Environmental Changes in Earth Systems*: xi + 466 pp. Rotterdam, Brookfield: A. A. Balkema. Price Dfl. 165.00 (hard covers), ISBN 90 5410 631 X.
- Boulomytis, V.T.G., Bernardes–marcos, M.E.C., Kruk, N.S., 2014, Avaliação do Comportamento Hidrológico da Bacia do Rio Juqueriquerê, Caraguatatuba, SP, https://www.researchgate.net/publication/262523358_Avaliacao_do_Comportamento_Hidrologico_da_Bacia_do_Rio_Juqueriquere_Caraguatatuba_SP_Assessment_of_the_hydrological_behavior_of_the_Juqueriquere_river_watershed_Caraguatatuba_Sao_Paulo_Brazil_-_origin.
- Bourotte, C.L.M., de Toledo, M.C.M., Duleba, W., Aramaqui, G.T., Campos, L.G.D., Viana, P.J., 2014, Kit didático “da rocha ao grão” de areia: *Terrae Didatica*, 10(3), 298-304, <https://doi.org/10.20396/td.v10i3.8637345>.
- Brazier, V., Bruneau, P. M., Gordon, J. E., & Rennie, A. F., 2012, Making space for nature in a changing climate: the role of geodiversity in biodiversity conservation: *Scottish Geographical Journal*, 128(3-4), 211-233, <https://doi.org/10.1080/14702541.2012.737015>.
- 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*, 86, 19-28, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.001>.
- Bruce, J. P., Frome, M., Haites, E., Janzen, H., Lal, R., Paustian, K., 1999, Carbon sequestration in soils: *Journal of soil and water conservation*, 54(1), 382-389, https://www.researchgate.net/publication/279891287_Carbon_sequestration_in_soils.
- Campos, J. F., 2000, Santo Antônio de Caraguatatuba: memória e tradições de um povo. Fundacc.
- Carcavilla, L., Díez-Herrero, A., Vegas, J., Diaz-Marínez, E., García-Cortés, A., Baeza, E., Rábano, I., Serrano, A. M., Marco, J. C. G., Gómez-Heras, M., 2019, Sistemas de indicadores para el seguimiento del estado de conservación del patrimonio geológico em la red de parques nacionales: Amengual, P. (Ed). *Proyectos de Investigación em Parques Nacionales*. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Serie Investigación em la Red, Madrid. 95-116, https://www.miteco.gob.es/en/red-parques-nacionales/programa-investigacion/05_monografia_luiscarcavilla_tcm38-506818.pdf.
- Carvalho, A.R., Marinho, A.M., de Sá Silva, A.C.R., Bernardes, M.E.C., 2013, Comparação entre os índices de qualidade da água (iqa) dos estuários dos rios itamambuca e juqueriquerê–litoral norte de são paulo–sob mesma sazonalidade: IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, <http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2013/VIII-021.pdf>.
- Cerri, R.I., Reis, F.A.G.V., Gramani, M.F., Rosolen, V., Luvizotto, G.L., do Carmo Giordano, L., Gabelini, B. M., 2018, Assessment of landslide occurrences in Serra do Mar mountain range using kinematic analyses: *Environmental Earth Sciences*, 77(9), 1-16, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7508-1>.
- Cerri R.I., Rosolen V., Reis F.A., Filho A.J.P., Vemado F., do Carmo Giordano L., Gabelini B.M., 2020, The assessment of soil chemical, physical, and structural properties as landslide predisposing factors in the Serra do Mar mountain range (Caraguatatuba, Brazil): *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1-14, <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01791->.

- Corrêa, I.C.S., Elias, A.R.D., 2001, Minerais pesados dos sedimentos do fundo da enseada de Caraguatatuba, Sao Paulo, Brasil: Pesquisas em Geociências, 28(1), 37-47, <https://doi.org/10.22456/1807-9806.20166>.
- Costanza, R., Daly, H.E., 1992, Natural capital and sustainable development: Conservation biology, 6(1), 37-46, <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1992.610037.x>.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Van Den Belt, M., 1997, The value of the world's ecosystem services and natural capital nature, 387(6630), 253-260, <https://doi.org/10.1038/387253a0>.
- Chakraborty, A., 2020, Mountains as a global heritage: arguments for conserving the natural diversity of mountain regions: Heritage, 3(2), 198-207, <https://doi.org/10.3390/heritage3020012>.
- CPRM, 1982, Projeto integração geológica da região metropolitana de São Paulo: Relatório, Folhas geológicas Caraguatatuba e Natividade da Serra 1:50, 000.
- CPRM, 1991, Projeto integração geológica da região metropolitana de São Paulo: Relatório, Folha geológica Pico do Papagaio 1:50, 000.
- CPRM, 2017, Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações – Município de Caraguatatuba (SP) 1:50 000, <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/19381?show=full>.
- Crofts R., Gordon J.E., 2015, Geoconservation in protected areas: Protected area governance and management. ANU Press, Canberra, 531-568, <https://www.jstor.org/stable/j.ctt1657v5d.25>.
- Crofts, R., 2019, Linking geoconservation with biodiversity conservation in protected areas: International Journal of Geoheritage and Parks, 7(4), 211-217, <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2019.12.002>.
- Croft, R., Gordon, J.E, Brilha J., Gray, M., Gunn, J., Larwood, J., Santucci, V.L., Tormey, D., Worboys, G.L., 2020, Guidelines for geoconservation in protected and conserved areas: Best practice Protected Areas Guidelines Series N°31. Gland, Switzzeland: IUCN, <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.31.en>
- Crofts, R., Tormey, D., & Gordon, J. E., 2021, Introducing New Guidelines on Geoheritage Conservation in Protected and Conserved Areas: Geoheritage, 13(2), 1-14, <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00552-0>.
- Cruz O., 1990, Contribuição geomorfológica ao estudo de escarpas da Serra do Mar: Revista do Instituto Geológico, 8(1): 9-20, <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.19900002>.
- Dantas M.E., 2016, Catálogo de Padrões de relevo no território brasileiro, <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/16589>.
- De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M., 2002, A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services: Ecological economics, 41(3), 393-408, [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7).
- Ehrlich, P.R., Mooney, H.A., 1983, Extinction, substitution, and ecosystem services: BioScience, 33(4), 248-254, <https://doi.org/10.2307/1309037>.
- Favoretti, M.R., Batalla, J.F., 2017, Levantamento da avifauna no mangue do Rio Juqueriquerê, Caraguatatuba-SP: Unisanta BioScience, 6(4), 272-285, <https://periodicos.unisanta.br/index.php/bio/article/view/953>.
- Fox, N., Graham, L. J., Eigenbrod, F., Bullock, J. M., & Parks, K. E., 2020, Incorporating geodiversity in ecosystem service decisions: Ecosystems and People, 16(1), 151-159. <https://doi.org/10.1080/26395916.2020.1758214>.
- Freire, D.S., Batalla, J.F., 2018, Caracterização da área de manguezal na Praia do Camaroeiro em Caraguatatuba (SP): Unisanta BioScience, 7(2), 107-125, <https://periodicos.unisanta.br/index.php/bio/article/view/1401/1169>.

- Florestal, V.1. 118p. (inclui Mapas). ISBN: 978-85-64808-16-4.
https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/wpcontent/uploads/sites/234/2017/11/Livro_Solos1.pdf. (Accessed 20 December 2020)
- Garcia, M.D.G.M., Reverte, F.C., Mucivuna, V.C., Arruda, K.E.C., Prochoroff, R., de Abreu Santos, P. L., Romão, R.M.M., 2019b, Geoconservação em áreas protegidas: contribuição de cursos para monitores ambientais no litoral norte do estado de São Paulo, Brasil: *Terra Didática*, 15, e019028-e019028, <http://dx.doi.org/10.20396/td.v15i0.8652390>.
- Garcia, M.D.G., Lama E.A., Martins L., Mazoca C.E.M., Bourotte C.L., 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*, 91(2), <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201920180514>.
- Garcia, M. G. M., Nascimento, M. A. L., Mansur, K. L., Pereira, R. G. F. A., 2022, Geoconservation strategies framework in Brazil: Current status from the analysis of representative case studies: *Geoheritage*. (128) 194-207, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.11.006>.
- Garima; Chandra, T., 2021, Sustainable Strategies for Management of Protected Areas-case of Okhla Bird Sanctuary, Delhi. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 796, No. 1, p. 012074). IOP Publishing, 10.1088/1755-1315/796/1/012074.
- Gigliotti C., Santos M.J., 2013, A expansão urbana de Caraguatatuba (1950-2010): uma análise das transformações socioespaciais: *Caminhos de Geografia*, 14(46), <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/17794>.
- Gordon, J. E., Barron, H. F., 2013, The role of geodiversity in delivering ecosystem services and benefits in Scotland: *Scottish Journal of Geology*, 49(1), 41-58, <http://dx.doi.org/10.1144/sjg2011-465>.
- Gordon, J. E., 2019, Geoconservation principles and protected area management: *International Journal of Geoheritage and Parks*, 7(4), 199-210, <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2019.12.005>.
- Gordon, J. E., Crofts, R., Gray, M., & Tormey, D., 2021. Including geoconservation in the management of protected and conserved areas matters for all of nature and people: *International Journal of Geoheritage and Parks*, <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2021.05.003>.
- Gray, M., 2011, Other nature: geodiversity and geosystem services: *Environmental Conservation*, 38(3), 271-274, <https://doi.org/10.1017/S0376892911000117>.
- Gray M., 2013, *Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature*. (2nd edition): Editora John Wiley Blackwell. England, Londres, 495p.
- Gray, M., 2018. The confused position of the geosciences within the “natural capital” and “ecosystem services” approaches: *Ecosystem services*, 34, 106-112, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.10.010>.
- Gray, M., 2021, Geodiversity: a significant, multi-faceted and evolving, geoscientific paradigm rather than a redundant term: *Proceedings of the Geologists' Association*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pgeola.2021.09.001>.
- Haines-Young, R., Potschin, M., 2012, *Common International classification of ecosystem services*. Nottingham: Centre for Environmental Management, University of Nottingham, https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2012/09/CICES-V4_Final_26092012.pdf.
- Heilbron M., Pedrosa-Soares A.C., Campos Neto M.D.C., Silva L.D., Trouw R.A.J., Janasi V.D.A., 2004, *Província mantiqueira*. Mantesso-Neto V, Bartorelli A, Carneiro CDR, p. 203-234, <https://www.researchgate.net/publication/284672209>.
- Hjort J., Gordon J.E., Gray M., Hunter Jr M.L., 2015, Why geodiversity matters in valuing nature's stage: *Conservation Biology*, 29(3): 630-639, <https://doi.org/10.1111/cobi.12510>.
- IBGE, 2017, *Hidrogeologia* 1:250, 000. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes->

- ambientais/geologia/15824-hidrogeologia.html?=&t=downloads. (Acesso em 15 Dezembro 2020).
- IBGE, 2021, Censo demográfico.
<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/caraguatatuba/panorama>.
- Juliano, K.A., Giusti, D.A., Muratori, A.M., 2008, Aspectos legais da degradação de solos em áreas de preservação permanente em mineração de areiano médio Iguaçú: Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32, 905-909, <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200045>.
- Lima, C.O., 2015, Zoneamento geoambiental para o município de Caraguatatuba-SP. Recurso online (114p). [Dissertação de mestrado]: Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.
 SP. <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/286590#:~:text=http%3A//repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/286590>.
- Marnika, E., Christodoulou, E., & Xenidis, A., 2015, Sustainable development indicators for mining sites in protected areas: tool development, ranking and scoring of potential environmental impacts and assessment of management scenarios: Journal of Cleaner Production, 101, 59-70, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.098>.
- Mazzucato, E., Bacci, D.C., Souza, C.R.G., Geomorphological heritage on the North Coast of the State of São Paulo: a perspective about current and past climate changes: Geoheritage, (Unpublished results).
- Mea, M.E.A., 2005, Ecosystems and Human Well-Being: wetlands and water synthesis, <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.358.aspx.pdf>.
- Meira, V. T., 2014, Evolução tectono-metamórfica Neoproterozoica dos complexos Embu e Costeiro no contexto de formação do Gondwana ocidental (leste do estado de São Paulo) [Tese de doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Moura, C.A., 2013, Avaliação de tendência a enchentes das bacias hidrográficas do município de Caraguatatuba (SP): Revista de Geografia (UFPE), 30(2), <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/229012/23414>.
- Mohriak W., Nemčok M., Enciso G., 2008, South Atlantic divergent margin evolution: rift-border uplift and salt tectonics in the basins of SE Brazil: Geological Society, London, Special Publications, 294(1): 365-398, <https://doi.org/10.1144/SP294.19>.
- Mora C.A.S., Campanha G.A.C., Wemmer K., 2013, Microstructures and K-Ar illite fine-fraction ages of the cataclastic rocks associated to the Camburu Shear Zone, Ribeira Belt, Southeastern Brazil: Brazilian Journal of Geology, 43(4):607-622, DOI: 10.5327/Z2317-48892013000400003.
- Nellemann, C., Corcoran, E. (Eds.), 2009, Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon: a rapid response assessment: UNEP/Earthprint, https://ccom.unh.edu/sites/default/files/publications/Nellemann_2010_BlueCarbon_book.pdf.
- Okida, R., Veneziani, P., 1998, O Sensoriamento Remoto como Alternativa no Estudo de Áreas de Inundação: um exemplo na região de Caraguatatuba (SP), http://marte.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.09.15.45/doc/1_79p.pdf.
- Paes, S.R., 1998, Espaço da vida, espaço da morte na trajetória caiçara, <https://nupaub.fflch.usp.br/sites/nupaub.fflch.usp.br/files/Silvia%20Regina%20Paes.pdf>.
- Pan, X., Shi, P., & Wu, N., 2020, Spatial–Temporal Interaction Relationship between Ecosystem Services and Urbanization of Urban Agglomerations in the Transitional Zone of Three Natural Regions: Sustainability, 12(23), 10211, <https://doi.org/10.3390/su122310211>.
- Pellegatti, C.H G., Galvani, E., 2010, Avaliação da precipitação na Serra do Mar–SP em

- eventos de diferentes intensidade e duração: *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, 14(1), 147-158, <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2010.74160>.
- Pereira, B.S., 2017, Verticalização da Avenida Prefeito Geraldo Nogueira da Silva, município de Caraguatatuba – SP. [Trabalho de Graduação Individual]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas.
- Perotti, L., Carraro, G., Giardino, M., De Luca, D. A., & Lasagna, M., 2019, Geodiversity evaluation and water resources in the Sesia Val Grande UNESCO Geopark (Italy): *Water*, 11(10), 2102, <https://doi.org/10.3390/w11102102>
- Petrobras, <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/unidade-de-caraguatatuba-completa-5-anos-com-marca-historica-de-producao-de-gas.htm>. (Acesso em 15 dezembro 2020).
- Queiroz, D. S., Garcia, M. G. M., 2022, The “hidden” geodiversity in the traditional approaches in ecosystem services: a perspective based on monetary valuation: *Geoheritage*, (14):44, <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00676-x>.
- Reverte F.C., Garcia M.G.M., Brilha J., Pellejero A.U., 2020, Assessment of impacts on ecosystem services provided by geodiversity in highly urbanised areas: A case study of the Taubaté Basin, Brazil: *Environmental Science & Policy*, 112:91-106, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.05.015>.
- Rosembach, R., 2013, Levantamento da atividade urbana nas adjacências do Parque Estadual da Serra do Mar-municípios de São Sebastião, Caraguatatuba e Ubatuba, SP, <http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.29.00.56.19/doc/p1495.pdf>.
- Rossi M., 2017, Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, V.1. 118p. (inclui Mapas). ISBN: 978-85-64808-16-4. https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/wp-content/uploads/sites/234/2017/11/Livro_Solos1.pdf. (Acesso em 20 Dezembro de 2020).
- São Paulo, 2012, Iritani, M. A., Ezaki S. As águas subterrâneas do estado de São Paulo. Cadernos de educação ambiental. Governo do estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto geológico.
- São Paulo, 2019, Parque Estadual Serra do Mar Caraguatatuba. <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/pesm/nucleos/caraguatatuba/>. (Acesso em 10 Agosto de 2020).
- Secron M.B., Hurtado S.N., Medeiros S.S., de Oliveira W.J., 2008, Preliminary Environmental Assessment for the site selection for the UTGCA (Gas Treatment Unit for Caraguatatuba-SP): 7th International Pipeline Conference, <http://dx.doi.org/10.1115/IPC2008-64244>.
- Silva, S.D., Braga, F.A., Fonseca, A.R., 2010, Análise de conflito entre legislação e uso da terra no município de Itabira-MG: *Caminhos da Geografia*, 11(934), 131-144, <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/16077>.
- Silva M.L.N., do Nascimento M.A.L., 2020, Ecosystem Services and Typology of Urban Geodiversity: Qualitative Assessment in Natal Town, Brazilian Northeast: *Geoheritage*, 12(3): 1-16, <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00479-y>.
- Souza C.R.G., 1992, Considerações sobre a origem de um depósito marinho pleistocênico no litoral norte do Estado de São Paulo: *Boletim IG-USP. Série Científica*, 23: 43-54, <https://doi.org/10.11606/issn.2316-8986.v23i0p43-54>.
- Souza, C.R.G., Suguio, K., Oliveira, A.M.S., Oliveira, P.E., 2005, Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto: Holos, Editora. 382p.: il.; 28, <https://www.abequa.org.br/livro.php>
- Souza, C.R.G., 2005a, Suscetibilidade morfométrica de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações em áreas costeiras: *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 6(1), <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v6i1.38>.
- Souza C.R., Luna G.C., 2008, Unidades quaternárias e vegetação nativa de planície costeira e baixa encosta da Serra do Mar no litoral norte de São Paulo: *Revista do Instituto*

- Geológico, 29(1-2): 1-18, <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.20080001>.
- Souza C.R., 2009, A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil: *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 9(1): 17-37, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340125003>.
- Souza, C.R.G., 2012, Praias arenosas oceânicas do estado de São Paulo (Brasil): síntese dos conhecimentos sobre morfodinâmica, sedimentologia, transporte costeiro e erosão costeira: *Revista do Departamento de Geografia*, 308-371, <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0112.0014>.
- Schrodt F., et al., 2019, Opinion: To advance sustainable stewardship, we must document not only biodiversity but geodiversity: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 116, n. 33, p. 16155-16158, <https://doi.org/10.1073/pnas.1911799116>.
- Steiner, N. S., Bowman, J., Campbell, K., Chierici, M., Eronen-Rasimus, E., Falardeau, M., ... & Wongpan, P., 2021, Climate change impacts on sea-ice ecosystems and associated ecosystem services: *Elem Sci Anth*, 9(1), 00007, <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00007>.
- Tansley, A.G., 1935, The use and abuse of vegetational concepts and terms *Ecology* 16, 284—307: *Progress in Physical Geography*, 31(5), 517-522, <http://dx.doi.org/10.1177/0309133307083297>.
- Terassi, P.M.B., Galvani, E., 2017, O efeito orográfico da Serra do Mar e o potencial erosivo das chuvas nas bacias hidrográficas do Ribeira e Litorânea-Paraná: *Revista Brasileira de Climatologia*, 21, <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v21i0.47621>.
- Tognetto, F., Perotti, L., Viani, C., Colombo, N., & Giardino, M., 2021, Geomorphology and geosystem services of the Indren-Cimalegna area (Monte Rosa massif–Western Italian Alps): *Journal of Maps*, 17(2), 161-172, <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.1898484>.
- Turra, A., Petracco, M., Amaral, A.C.Z., Denadai, M.R., 2014, Temporal variation in life-history traits of the clam *Tivela mactroides* (Bivalvia: Veneridae): Density-dependent processes in sandy beaches: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 150, 157-164, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2013.06.004>.
- Van Ree, C.C.D.F., Van Beukering, P.J.H., Boekestijn, J., 2017, Geosystem services: A hidden link in ecosystem management: *Ecosystem services*, 26, 58-69, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.05.013>.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Sobre a avaliação da geodiversidade

A geoconservação visa, grosso modo, aplicar estratégias de inventário, conservação e divulgação dos elementos e processos da geodiversidade que possuem excepcional valor científico (patrimônio geológico ou geopatrimônio) e potencial turístico e educativo (Brilha, 2016). Portanto, a geoconservação é inicialmente condicionada pela geodiversidade, embora autores como Carcavilla (2007) apontem que o patrimônio geológico não é diretamente relacionado a um alto índice de geodiversidade, abordagem metodológica conhecida como mapas índice da geodiversidade.

Para além do valor patrimonial ou do emprego da geodiversidade sob uma abordagem pontual e restrita, deve-se destacar que ela é detentora de inúmeros valores e aplicações (Gray, 2004; 2013). Estes aspectos podem ser mais bem aproveitados sob uma perspectiva direcionada ao ordenamento territorial e à conservação da natureza, que considere uma abordagem holística da geodiversidade, sem necessariamente focar em locais com altos índices da geodiversidade.

Neste caso, considerou-se no trabalho a geodiversidade sob uma das conceituações mais recentes, a de Gray (2013), que a evidencia como elementos e processos do meio físico abrangentes que formam o substrato para biodiversidade e para o desenvolvimento humano. Neste estudo buscou-se explorar as características da geodiversidade do município de Caraguatatuba, que funcionou como uma área piloto, com o intuito de contribuir com novas maneiras de avaliação da geodiversidade que gerem políticas públicas eficientes, bem como corroborar o alcance dos objetivos das agendas ambientais globais em nível minimamente local.

As ferramentas metodológicas empregadas no trabalho combinaram abordagens qualitativas e quantitativas que se enquadram numa das três possibilidades de avaliação da geodiversidade, denominada por Zowlinski et al. (2018) de métodos qualitativo-quantitativo (ou misto).

A abordagem qualitativa, representada pela confecção do mapa geoambiental, permitiu a caracterização da geodiversidade sob uma perspectiva prática e útil ao aprimoramento do planejamento e da gestão territorial de Caraguatatuba. Os dados obtidos culminaram, por exemplo, na definição das potencialidades e das limitações de cada domínio e cada unidade geoambiental (Quadro 1, Fig 13 e 14).

Quadro 1 – Potencialidades e limitações por unidade geoambiental no município de Caraguatatuba (SP)

	Domínio Geoambiental	Unidade geoambiental	Potencialidades	Limitações
Zona de Amortecimento e entorno	Domínio dos sedimentos inconsolidados ou pouco consolidados, depositados em meio aquoso ou misto (DC)	Depósitos tecnogênicos (DC_Tec)	Recursos minerais: turfa, argila, areia, saibro, gnaiss, granito, água mineral.	Descaracterização da geomorfologia de morros e saprólito bastante friável em locais pontuais, que pode oferecer risco de instabilidade.
		Ambiente marinho costeiro (DCmc_Dmar)	Suporte para a biodiversidade, foz de rios, locais adequados ao lazer, esportes, turismo e assentamentos urbanos.	Processos naturais podem ser determinantes a algumas limitações como, por exemplo, estruturais devido à erosão costeira. Além disso, a área é altamente impermeável, o que torna inadequada à criação de cemitérios e obras com impermeabilização. Planície com possibilidade de inundação em alguns pontos, embora a suscetibilidade à inundação seja baixa.
		Ambientes de planície de inundação recentes (DCa)	Locais bem drenados e adequados à plantação de hortaliças.	Área com suscetibilidade à inundação predominantemente alta.
		Ambiente misto (continental/marinho) (DCm_Dm)	Suporte a vegetações variadas e pastagem.	Locais inadequados a obras com impermeabilização e suscetibilidade de inundação média a alta, sendo a última mais predominante.
		Manguezal (DCm_Dm1)	Locais propícios a navegação, suporte e distribuição de avifauna e vegetação e mineração de areia.	Área com suscetibilidade à inundação alta.
Área protegida	Domínio dos sedimentos cenozoicos inconsolidados do tipo coluvião e tálus (DCICT)	Predomínio de colúvio e subordinados de tálus (DCICT_Co-T)	Recursos minerais como saibro e captação de água no Rio Guaxinduba pelos moradores.	Suscetibilidade a movimentos de massa predominantemente baixa a média.
	Domínio dos complexos gnáissico-migmatíticos e granulíticos (DCGMGL)	Gnaisses indiferenciados (DCGMGLgni)	Porção restrita no município e sem acesso.	Porção restrita no município e sem acesso e suscetibilidade de movimento de massa baixa a média.
		Predomínio de quartzito (DCGMGLqt)	Paisagens panorâmicas com mirantes naturais, área com perfil pedogenético bem desenvolvido, atividades de lazer e turismo.	Locais mais restritos à área protegida e com acesso por trilhas e suscetibilidade a movimentos de massa média a alta em locais pontuais.

	Predomínio de gnaisses ortoderivados. Pode conter porções migmatíticas. (DCGMGLgno)	Presença de afluentes de rios e cachoeiras.	Suscetibilidade a movimentos de massa média a alta em locais de vertentes mais íngremes, com possibilidades de corridas de massa.
Domínios dos corpos máficos-ultramáficos (DCMU)	Metamáficas, anfibolitos e gnaisses calcissilicáticos (DCMUmG)	Afloramentos de solos com perfis bem desenvolvidos, locais turísticos com acesso a rios e corredeiras.	Predomínio de intemperismo químico (esfoliação esferoidal), físico e biológico com suscetibilidade a movimentos de massa média a alta com possibilidades de corridas de massa.
Domínio dos complexos granitoides deformados (DGCR2)	Séries granítica subalcalinas, calcialcalinas a toleíticas (DGCR2_alc)	Suporte para cemitérios, paisagens panorâmicas para mirantes, trilhas, proteção de nascentes pelos neossolos do topo da Serra do Mar, cachoeiras, cambissolos háplicos como suporte à Mata Atlântica, infraestrutura para gasodutos da Petrobras, geoformas, geossítios e sítios da geodiversidade e recursos minerais para a construção civil.	Perfis de solos provavelmente pouco profundos e recobertos por vegetação, terrenos com topografias íngremes, propriedades de solo e de rocha que desencadeiam escorregamentos (de alta a média suscetibilidade a movimentos de massa e corridas de massa) e área proibida à exploração de recursos naturais, apenas uso indireto.



Figura 13 – (A) Pedreira de granito à beira da rodovia translitorânea, (B) Erosão costeira na Praia Massaguaçu e contenção com estrutura rígida já degradada, (C) Plantação de hortaliça em planície fluvial, (D) Vista da planície fluviomarinha desocupada e com pasto, (E) Passivo ambiental na planície fluviomarinha ocasionada pela impermeabilização do solo a partir da duplicação do contorno da Tamoios na Bacia do Rio Juqueriquerê, (F) Embarcações e suporte de avifauna no Rio Juqueriquerê. Fotos da autora.



Figura 14 – (G) Ao fundo depósito de tálus em formato triangular, (H) Captação de água do Rio Guaxinduba pelos moradores, (I) Mirante natural denominado Mirante dos Tropeiros, (J) Rio Pardo, afluente do Rio Camburu, (K) Perfil de solo do domínio geoambiental Corpos máficos e ultramáficos e (L) Vista do Mirante dos Tropeiros para a vegetação de Mata Atlântica, em particular Floresta ombrófila densa montana (São Paulo, 2008). Fotos da autora.

De acordo com o quadro 1, a maioria dos domínios geoambientais (quatro dos cinco domínios) se inserem no Parque Estadual da Serra do Mar. O domínio “Complexo granitoides deformados” é predominante e, por consequência, é o que possui maior detalhamento de informações. Os dados gerados auxiliam tanto na disponibilização e na atualização de informações integradas do meio físico em escala de detalhe (nível municipal), que hoje se mostram escassos, como apontado em Santos et al. (2017), quanto na facilitação da identificação e da avaliação da geodiversidade no contexto de Caraguatatuba.

A definição de EGVs intrínsecas a cada unidade geoambiental também permitiu a identificação de ameaças naturais e antrópicas que estão implícitas nas limitações. Essas informações são significativas para a gestão territorial e podem contribuir ao aprimoramento de dispositivos legais já existentes, como discutido nos capítulos 4 e 5. Como exemplo tem-se os projetos de atualização dos futuros ZEEs e do projeto Orla em áreas costeiras paulistas. Isso realça a relação da geodiversidade e suas potencialidades e limitações com os setores ambiental, econômico e social, em especial em áreas protegidas e costeiras. Estas áreas são chave para o desenvolvimento de políticas públicas e ações que corroborem as discussões das mudanças climáticas e dos ODSs frente ao exacerbado processo de urbanização.

Neste sentido, a avaliação dos impactos aos SE providos pela geodiversidade complementa os resultados qualitativos do mapeamento geoambiental e traz dados numéricos das perdas na geodiversidade. Os resultados obtidos por essa abordagem evidenciaram uma ferramenta de grande contribuição ao tópico de conservação da natureza e, em especial, à geoconservação.

Em nível global e nacional, a avaliação de impactos aos SE pode complementar as discussões levantadas pelo último relatório do Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), que traz dados alarmantes acerca do aumento do nível do mar e das inundações em áreas costeiras. Esta situação pode ser agravada se nenhuma medida for tomada em relação às alterações no ecossistema costeiro, desencadeadas essencialmente pelas ações antrópicas.

Diversas ações em nível local e de conservação da natureza voltadas à geoconservação podem ser tomadas a partir dos dados base aqui apresentados. Estas contribuições vinculam-se a (i) atualização do plano de manejo do PESH (São Paulo, 2008) com inserção de temas acerca da geodiversidade, serviços ecossistêmicos, ameaças e patrimônio geológico; (ii) promoção de cursos para monitores ambientais com temática voltada à geodiversidade e seus benefícios, a exemplo de Garcia et al. (2019) para o litoral paulista, (iii) aprimoramento da conscientização dos moradores da ZA e do município acerca das contribuições da geodiversidade para o bem-

estar humano, história da Terra e manutenção da biodiversidade por meio de cursos e atividades com abordagem da aprendizagem social; (iv) apresentação das metodologias empregadas aos tomadores de decisões para conhecimento, compreensão e tomada de decisões assertivas e (v) instalação de novos painéis interpretativos com a temática.

Com base nisso, as Geociências e, em particular, a geoconservação, se destacam como instrumentos para o alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) na agenda global até o ano de 2030. O presente trabalho, por meio da avaliação da geodiversidade e seus possíveis desdobramentos, se relaciona de forma direta e indireta aos seguintes objetivos (<https://odsbrasil.gov.br/>):

4. Educação de qualidade: foco no desenvolvimento sustentável;
6. Água potável e saneamento básico: garantir a disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos;
8. Emprego decente e crescimento econômico: com foco na elaboração e implementação de políticas que promovam o turismo sustentável, que gera empregos e promove a cultura e os produtos locais;
11. Cidades e comunidades sustentáveis: tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis com foco na participação dos cidadãos na gestão territorial;
13. Ação contra a mudança global do clima: tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos com foco em estratégias e planejamentos nacionais, aprimorar a comunicação e educação para a conscientização dos impactos da mudança do clima;
14. Vida na água: conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e os recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável com foco aos ecossistemas costeiros;
15. Vida terrestre: proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade.

6.2 Perspectivas para áreas protegidas

Uma vez que o PESH dispõe de dez núcleos administrativos, faz-se relevante a aplicação das metodologias empregadas às demais áreas de abrangência do parque, para extensão da abordagem, das discussões da geodiversidade e geoconservação. A análise do comportamento das ameaças dos SE providos pela geodiversidade em outros municípios é também relevante à

compreensão dos vetores antrópicos de causa e aprimoramento de estratégias de gestão territorial frente aos ODS e às mudanças climáticas.

Com os percentuais de perda dos SE obtidos no período de avaliação da geodiversidade pode-se realizar projeções. As projeções são instrumentos empregados em diversos campos da Geociências que permitem avaliar estratégias que envolvem os setores ambiental, social e econômico considerando previsões. Neste caso, a metodologia proposta por Reverte et al. (2020) é especialmente útil para traçar estratégias de planejamento e ordenamento territorial local que priorize o funcionamento e manutenção destes serviços e suas áreas de abrangência, como as APs.

Se considerarmos o desenvolvimento das práticas de geoconservação em nível nacional, poucas são as abordagens que se voltam às etapas de monitoramento da geodiversidade ou de locais de interesse geológico (LIGs). Os monitoramentos são estratégicos tanto para a avaliação da degradação e perda da geodiversidade, quanto para a avaliação do uso turístico e segurança dos visitantes. No Brasil, a discussão ganhou visibilidade após a queda de um bloco de rocha sedimentar dos Cânions de Capitólio (Minas Gerais), que atingiu cerca de 32 turistas com registros de mortes. A região, inserida em um contexto altamente turístico com diversos mirantes e visitas o ano inteiro, possui áreas de risco a movimentos de quedas e tombamentos não monitoradas pelos órgãos legais.

O episódio trágico elucida a urgência de se propor formas de monitoramento para a geodiversidade. Isto é particularmente relevante em APs que recebem um contingente significativo de visitantes, além das estratégias de conservação desconsiderarem as vulnerabilidades e as ameaças da geodiversidade, que refletem na pouca prática e evolução dos monitoramentos para esta porção. Em especial às ameaças naturais, não abrangidas pela abordagem de quantificação de Reverte et al. (2020), tem-se como alternativa os denominados geoindicadores, um sistema de parâmetros inicialmente propostos pela Comissão de Ciências Geológicas para Planejamento Ambiental da *International Union of Geological Sciences* (IUGS).

Os geoindicadores podem ser compreendidos como parâmetros mensuráveis de modo qualitativo ou quantitativo para finalidades de diagnóstico de estado de integridade, estabilidade e sustentabilidade do meio físico e que possibilitam a previsão de mudanças ambientais rápidas (Berger e Iams, 1996; Berger et al., 1997; Berger, 1998; Berger, 2002). Estes parâmetros se mostram como ferramentas relevantes em APs, pois permitem a identificação de indicadores de mudança tanto antrópicos, quanto, essencialmente, naturais. Isto pode ser especialmente

relevante para LIGs de excepcional valor científico que se relacionam com a função de conhecimento dos SE providos pela geodiversidade.

Essa medida já tem sido empregada em parques espanhóis para monitoramento do estado e degradação de geossítios (Carcavilla et al., 2019) e são, inclusive, previstos na legislação espanhola (Vegas et al., 2015). Com isso, as APs brasileiras podem se utilizar de tais ferramenta para monitoramento e garantia destes locais para a promoção de atividades educativas, previstas para a categoria de AP no SNUC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alahuhta J., Ala-Hulkko T., Tukiainen H., Purola L., Akujärvi A., Lampinen R., & Hjort J., 2018, The role of geodiversity in providing ecosystem services at broad scales: Ecological Indicators, 91:47-56, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.068>.
- Almeida F.F.M. de, 1964, Geologia do estado de São Paulo: Boletim, n. 41.
- Almeida F.F.M., Carneiro C.D.R., 1998, Origem e evolução da Serra do Mar: Revista Brasileira de Geociências, v. 28, 2:135-150, <https://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/11205/10667>.
- ANM., 2020, <http://sigmine.dnpm.gov.br/webmap/>.
- Araujo A.M., Pereira, D.I., 2018, A New Methodological Contribution for the Geodiversity Assessment: Applicability to Ceará State (Brazil): Geoheritage, 10:591-605, <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0250-3>.
- Arruda K.E.C., Garcia M.G.M., Del Lama E.A., 2017, Inventário e quantificação do patrimônio geológico do município de Caraguatatuba, São Paulo: Geociências, (36)3:447-462, <https://doi.org/10.5016/geociencias.v36i3.11340>.
- Arruda, K. E. C., 2017, A Geoconservação como subsídio à gestão territorial sustentável: o mapa geoturístico do litoral norte do estado de São Paulo [Tese de doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 10.11606/T.44.2018.tde-26042018-091309.
- Balaguer, L.P., Garcia, M.G.M., Ribeiro, L.M.A.L., Combined assessment of geodiversity as a tool to territorial management: application to Southeastern coast of State of São Paulo, Brazil: Geoheritage. (Não publicado).
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., Silliman, B. R., 2011, The value of estuarine and coastal ecosystem services: Ecological monographs, 81(2), 169-193, <https://doi.org/10.1890/10-1510.1>.
- Barros, F.L., Mansur, K.L., 2018, Desafios da gestão costeira integrada da Região dos Lagos (RJ): uma análise baseada na vulnerabilidade costeira e nos serviços ecossistêmicos da geodiversidade: Revista Brasileira de Geografia, 63(1), 73-97, https://doi.org/10.21579/issn.2526-0375_2018_n1_p73-97.
- Bastos Araújo, A.B., Medeiros, D.D.S., Hasenack, H., Azevedo, L.S., Fitz, P.R., Waskow, R.P., Kautzmann, R.M., 2013, Contribuição à Gestão Ambiental da Extração de Basalto em Nova Prata, RS: Mapas de APPs e mineração, <http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.22.34.34/doc/p0116.pdf>.
- Berger, A. R.; Iams, W. J. (eds.), 1996, Geoinicators. Assessing Rapid Environmental Changes in Earth Systems: xi + 466 pp. Rotterdam, Brookfield: A. A. Balkema. Price Dfl. 165.00 (hard covers), ISBN 90 5410 631 X.
- Berger, A. R., 1997, Assessing rapid environmental change using geoinicators: Environmental Geology, 32(1), 36-44.
- Berger, A. R., 1998, Environmental change, geoinicators, and the autonomy of nature: GSA Today, 8(1): 3-8, [extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.geosociety.org%2Fgsatoday%2Farchive%2F8%2F1%2Fpdf%2Fi1052-5173-8-1-3.pdf&cien=568906&chunk=true](https://www.geosociety.org/2Fgsatoday%2Farchive%2F8%2F1%2Fpdf%2Fi1052-5173-8-1-3.pdf&cien=568906&chunk=true).
- Berger, A., 2002, Tracking rapid geological change: Episodes, 25 (3):154-159, <https://doi.org/10.18814/epiugs/2002/v25i3/001>.
- Betard F., Peulvast J.P., 2019, Geodiversity Hotspots: Concept, method and cartographic application for geoconservation purposes at a regional scale: Environmental management, 63(6): 822-834, <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01168-5>.
- Boulomytis, V.T.G., Bernardes-marcos, M.E.C., Kruk, N.S., 2014, Avaliação do

- Comportamento Hidrológico da Bacia do Rio Juqueriquerê, Caraguatatuba, SP, https://www.researchgate.net/publication/262523358_Avaliacao_do_Comportamento_Hidrologico_da_Bacia_do_Rio_Juqueriquere_Caraguatatuba_SP_Assessment_of_the_hydrological_behavior_of_the_Juqueriquere_river_watershed_Caraguatatuba_Sao_Paulo_Brazil_-_origin.
- Bourotte, C.L.M., de Toledo, M.C.M., Duleba, W., Aramaqui, G.T., Campos, L.G.D., Viana, P.J., 2014, Kit didático “da rocha ao grão” de areia: *Terrae Didatica*, 10(3), 298-304, <https://doi.org/10.20396/td.v10i3.8637345>.
- Brazier, V., Bruneau, P. M., Gordon, J. E., & Rennie, A. F., 2012, Making space for nature in a changing climate: the role of geodiversity in biodiversity conservation: *Scottish Geographical Journal*, 128(3-4), 211-233, <https://doi.org/10.1080/14702541.2012.737015>.
- Brilha J., 2005, Patrimônio geológico e geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica: Palimage Editores, Braga, 190p.
- 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*, 86, 19-28, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.001>.
- Bruce, J. P., Frome, M., Haites, E., Janzen, H., Lal, R., Paustian, K., 1999, Carbon sequestration in soils: *Journal of soil and water conservation*, 54(1), 382-389, https://www.researchgate.net/publication/279891287_Carbon_sequestration_in_soils.
- Campos, J. F., 2000, Santo Antônio de Caraguatatuba: memória e tradições de um povo. Fundacc.
- Carcavilla, L., Díez-Herrero, A., Vegas, J., Diaz-Marínez, E., García-Cortés, A., Baeza, E., Rábano, I., Serrano, A. M., Marco, J. C. G., Gómez-Heras, M., 2019, Sistemas de indicadores para el seguimiento del estado de conservación del patrimonio geológico em la red de parques nacionales: Amengual, P. (Ed). *Proyectos de Investigación em Parques Nacionales*. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Serie Investigación em la Red, Madrid. 95-116, https://www.miteco.gob.es/en/red-parques-nacionales/programa-investigacion/05_monografia_luiscarcavilla_tcm38-506818.pdf.
- Carvalho, A.R., Marinho, A.M., de Sá Silva, A.C.R., Bernardes, M.E.C., 2013, Comparação entre os índices de qualidade da água (iqa) dos estuários dos rios itamambuca e juqueriquerê–litoral norte de são paulo–sob mesma sazonalidade: IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, <http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2013/VIII-021.pdf>.
- Cerri, R.I., Reis, F.A.G.V., Gramani, M.F., Rosolen, V., Luvizotto, G.L., do Carmo Giordano, L., Gabelini, B. M., 2018, Assessment of landslide occurrences in Serra do Mar mountain range using kinematic analyses: *Environmental Earth Sciences*, 77(9), 1-16, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7508-1>.
- Cerri R.I., Rosolen V., Reis F.A., Filho A.J.P., Vemado F., do Carmo Giordano L., Gabelini B.M., 2020, The assessment of soil chemical, physical, and structural properties as landslide predisposing factors in the Serra do Mar mountain range (Caraguatatuba, Brazil): *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1-14, <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01791->.
- Coutinho J.M.V., 2008, Enxame de diques da junção tríplice do Paraná, Brasil meridional: *Geologia USP. Série Científica*, 8(2): 28-52, <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2008000200003>.
- Corrêa, I.C.S., Elias, A.R.D., 2001, Minerais pesados dos sedimentos do fundo da enseada de Caraguatatuba, Sao Paulo, Brasil: *Pesquisas em Geociências*, 28(1), 37-47, <https://doi.org/10.22456/1807-9806.20166>.
- Costanza, R., Daly, H.E., 1992, Natural capital and sustainable development: *Conservation biology*, 6(1), 37-46, <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1992.610037.x>.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Van Den Belt, M.,

- 1997, The value of the world's ecosystem services and natural capital nature, 387(6630), 253-260, <https://doi.org/10.1038/387253a0>.
- Costanza, R., De Groot, R., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., ... & Grasso, M., 2017, Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go?: *Ecosystem services*, 28, 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>.
- Chakraborty, A., 2020, Mountains as a global heritage: arguments for conserving the natural diversity of mountain regions: *Heritage*, 3(2), 198-207, <https://doi.org/10.3390/heritage3020012>.
- CPRM, 1982, Projeto integração geológica da região metropolitana de São Paulo: Relatório, Folhas geológicas Caraguatatuba e Natividade da Serra 1:50, 000.
- CPRM, 1991, Projeto integração geológica da região metropolitana de São Paulo: Relatório, Folha geológica Pico do Papagaio 1:50, 000.
- CPRM, 2017, Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações – Município de Caraguatatuba (SP) 1:50 000, <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/19381?show=full>.
- Crisp J.R., Ellison J.C., Fischer A., 2020, Current trends and future directions in quantitative geodiversity assessment: *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, <https://doi.org/10.1177%2F0309133320967219>.
- Crofts R., Gordon J.E., 2015, Geoconservation in protected areas: Protected area governance and management. ANU Press, Canberra, 531-568, <https://www.jstor.org/stable/j.ctt1657v5d.25>.
- Crofts, R., 2019, Linking geoconservation with biodiversity conservation in protected areas: *International Journal of Geoheritage and Parks*, 7(4), 211-217, <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2019.12.002>.
- Crofts, R., Gordon, J. E., Brilha, J., Murray, G., Gunn, J., Larwood, J., Santucci, V. L., Tormey, D., Worboys, G. L. Groves, C., 2020: Guidelines for geoconservation in protected and conserved areas, IUCN, <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.31.en>.
- Crofts, R., Tormey, D., & Gordon, J. E., 2021, Introducing New Guidelines on Geoheritage Conservation in Protected and Conserved Areas: *Geoheritage*, 13(2), 1-14, <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00552-0>.
- Cruz O., 1974, A Serra do Mar e o litoral na região de Caraguatatuba: *Revista Brasileira de Geografia*, 37(3): 73-138.
- Cruz O., 1990, Contribuição geomorfológica ao estudo de escarpas da Serra do Mar: *Revista do Instituto Geológico*, 8(1): 9-20, <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.19900002>.
- Dai, F. C., Lee, C. F., & Zhang, X. H., 2001, GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study: *Engineering geology*, 61(4), 257-271, [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00028-X).
- Dantas M.E., 2016, Catálogo de Padrões de relevo no território brasileiro, <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/16589>.
- De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M., 2002, A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services: *Ecological economics*, 41(3), 393-408, [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7).
- Dias V.C., Martins T.D., Gramani M.F., Coelho R.D., Dias H.C., Vieira B.C., 2019, Morphology of debris flow deposits from a 1967 event in Caraguatatuba, Serra do Mar, Brazil: The Association of Environmental and Engineering Geologists; special publication 28. Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library, <http://dx.doi.org/10.25676/11124/173160>.
- Dunlop I., Larwood J.G., Burek C.V., 2018, Geodiversity Action Plans: A method to facilitate, structure, inform and record action for geodiversity: Reynard, E.; Brilha, J. (Eds.) *Geoheritage: Assessment, Protection and Management*. Elsevier, p. 53-65,

- <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00003-4>.
- Ehrlich, P.R., Mooney, H.A., 1983, Extinction, substitution, and ecosystem services: *BioScience*, 33(4), 248-254, <https://doi.org/10.2307/1309037>.
- Favoretti, M.R., Batalla, J.F., 2017, Levantamento da avifauna no mangue do Rio Juqueriquerê, Caraguatatuba-SP: *Unisanta BioScience*, 6(4), 272-285, <https://periodicos.unisanta.br/index.php/bio/article/view/953>.
- Fernández A., Fernández T., Pereira D.I., Nieto L.M., 2020, Assessment of Geodiversity in the Southern Part of the Central Iberian Zone (Jaén Province): Usefulness for Delimiting and Managing Natural Protected Areas: *Geoheritage*, 12:20, <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00447-6>.
- Ferreira C., Sciota L., Vedovello R., Fernandes Da Silva P.C., 2008, Definição e análise dos indicadores de degradação ambiental associada às áreas mineradas no município de Caraguatatuba, SP, DOI: 10.13140/RG.2.1.5117.0724.
- Forte J., 2014, Avaliação quantitativa da geodiversidade: desenvolvimento de instrumentos metodológicos com aplicação ao ordenamento do território. [Tese de doutoramento], Universidade de Minho, Portugal. <http://hdl.handle.net/1822/35857>.
- Forte J.P., Brilha J., Pereira D.I., Nolasco M., 2018, Kernel density applied to the quantitative assessment of geodiversity: *Geoheritage*, 10(2): 205-217, <https://doi.org/10.1007/s12371-018-0282-3>.
- Fox, N., Graham, L. J., Eigenbrod, F., Bullock, J. M., & Parks, K. E., 2020, Incorporating geodiversity in ecosystem service decisions: *Ecosystems and People*, 16(1), 151-159, <https://doi.org/10.1080/26395916.2020.1758214>.
- Florestal, V.1. 118p. (inclui Mapas), ISBN: 978-85-64808-16-4. https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/wpcontent/uploads/sites/234/2017/11/Livro_Solos1.pdf. (Acesso em 20 Dezembro 2020).
- Franco, J. L. D. A., Schittini, G. D. M., & Braz, V. D. S., 2015, História da conservação da natureza e das áreas protegidas: panorama geral, <https://periodicos.furg.br/hist/article/view/5594>.
- Freire, D.S., Batalla, J.F., 2018, Caracterização da área de manguezal na Praia do Camaroeiro em Caraguatatuba (SP): *Unisanta BioScience*, 7(2), 107-125, <https://periodicos.unisanta.br/index.php/bio/article/view/1401/1169>.
- Garcia, M.D.G., Lama E.A., Martins L., Mazoca C.E.M., Bourotte C.L., 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*, 91(2), <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201920180514>.
- Garcia, M.D.G.M., Reverte, F.C., Mucivuna, V.C., Arruda, K.E.C., Prochoroff, R., de Abreu Santos, P. L., Romão, R.M.M., 2019b, Geoconservação em áreas protegidas: contribuição de cursos para monitores ambientais no litoral norte do estado de São Paulo, Brasil: *Terræ Didática*, 15, e019028-e019028, <http://dx.doi.org/10.20396/td.v15i0.8652390>.
- 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*, 11(4): 1257-1266, <https://doi.org/10.1007/s12371-019-00383-0>.
- Garcia, M. G. M., Nascimento, M. A. L., Mansur, K. L., Pereira, R. G. F. A., 2022, Geoconservation strategies framework in Brazil: Current status from the analysis of representative case studies: *Geoheritage*. (128) 194-207, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.11.006>.
- Garima; Chandra, T., 2021, Sustainable Strategies for Management of Protected Areas-case of Okhla Bird Sanctuary, Delhi. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 796, No. 1, p. 012074). IOP Publishing, 10.1088/1755-1315/796/1/012074.

- Garda G.M., Schorscher J.H.D., 1996, Basic and ultrabasic coastal dykes adjacent to the Sao Sebastiao Channel (North coast of Sao Paulo State, Brazil): *Revista do Instituto Geologico*, 17(1/2): 7-31, <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.19960001>.
- Gigliotti C., Santos M.J., 2013, A expansão urbana de Caraguatatuba (1950-2010): uma análise das transformações socioespaciais: *Caminhos de Geografia*, 14(46), <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/17794>.
- Gonçalves J.B., 2018, Mapeamento da geodiversidade no município de Miguel Pereira – RJ: abordagens metodológicas e sua contribuição para a gestão territorial. [Trabalho de Conclusão de Curso], Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/6934>.
- Gordon, J. E., Barron, H. F., 2013, The role of geodiversity in delivering ecosystem services and benefits in Scotland: *Scottish Journal of Geology*, 49(1), 41-58, <http://dx.doi.org/10.1144/sjg2011-465>.
- Gordon, J. E., 2019, Geoconservation principles and protected area management: *International Journal of Geoheritage and Parks*, 7(4), 199-210, <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2019.12.005>.
- Gordon, J. E., Crofts, R., Gray, M., & Tormey, D., 2021. Including geoconservation in the management of protected and conserved areas matters for all of nature and people: *International Journal of Geoheritage and Parks*, <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2021.05.003>.
- Gray M., 2004, *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. John Wiley & Sons.
- Gray, M., 2011, Other nature: geodiversity and geosystem services: *Environmental Conservation*, 38(3), 271-274, <https://doi.org/10.1017/S0376892911000117>.
- Gray M., 2012, Valuing geodiversity in an ‘ecosystem services’ context: *Scottish Geographical Journal*, 128(3-4): 177-194, <https://doi.org/10.1080/14702541.2012.725858>.
- Gray M., 2013, *Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature*. (2nd edition): Editora John Wiley Blackwell. England, Londres, 495p.
- Gray, M., 2018. The confused position of the geosciences within the “natural capital” and “ecosystem services” approaches: *Ecosystem services*, 34, 106-112, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.10.010>.
- Gray M., 2018, Geodiversity: the backbone of geoheritage and geoconservation: *Geoheritage*, Elsevier, p. 13-25, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00001->.
- Gray M., 2019, Geodiversity, geoheritage and geoconservation for society: *International Journal of Geoheritage and Parks*, 7(4):226-236, <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2019.11.001>.
- Gray, M., 2021, Geodiversity: a significant, multi-faceted and evolving, geoscientific paradigm rather than a redundant term: *Proceedings of the Geologists' Association*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pgeola.2021.09.001>.
- Gramani M.F., 2001, Caracterização geológica-geotécnica das corridas de detritos (“Debris Flows”) no Brasil e comparação com alguns casos internacionais. [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.
- Haines-Young, R., Potschin, M., 2012, *Common International classification of ecosystem services*. Nottingham: Centre for Environmental Management, University of Nottingham, https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2012/09/CICES-V4_Final_26092012.pdf.
- Hasui, Y., 2010, A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional: *Geociências*, 141-169, <https://ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7147/6592>.
- Hasui Y., Carneiro C.D.R., de Almeida F.F.M., Bartorelli A. (Ed.), 2012, *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca.
- Heilbron M., Pedrosa-Soares A.C., Campos Neto M.D.C., Silva L.D., Trouw R.A.J., Janasi

- V.D.A., 2004, Província mantiqueira. Mantesso-Neto V, Bartorelli A, Carneiro CDR, p. 203-234, <https://www.researchgate.net/publication/284672209>.
- Hjort J., Gordon J.E., Gray M., Hunter Jr M.L., 2015, Why geodiversity matters in valuing nature's stage: *Conservation Biology*, 29(3): 630-639, <https://doi.org/10.1111/cobi.12510>.
- IBGE, 1991, Censo demográfico 1991. Resultados do universo relativos às características da população e dos domicílios. Rio de Janeiro, p. 1-764. https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/82/cd_1991_n3_caracteristicas_populacao_domicilios_ac.pdf. (Acesso em Novembro 2020).
- IBGE, 2010, Arranjos populacionais e concentrações urbanas do Brasil. Coordenação de Geografia, 2ª edição, Rio de Janeiro. ISBN 978-85-240-4406-9. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=299700>. (Acesso em 15 de Dezembro de 2020).
- IBGE, 2017, Hidrogeologia 1:250, 000. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geologia/15824-hidrogeologia.html?=&t=downloads>. (Acesso em 15 Dezembro 2020).
- IBGE, 2020, Caraguatatuba. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/caraguatatuba/panorama>. (Acesso em 29 Novembro de 2020).
- IBGE, 2021, Censo demográfico. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/caraguatatuba/panorama>.
- IUCN, 2008, Resolución 4.040 Conservación de la geodiversidade y el patrimônio geológico, https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/resrecfiles/WCC_2020_RES_088_ES.pdf. (Acesso em 15 Dezembro de 2020).
- IUCN, 2012, Resolución 048 Valorización y conservación del patrimônio geológico dentro del Programa de la IUCN 2013-2016. https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/resrecfiles/WCC_2012_RES_48_ES.pdf. (Acesso em 15 de Dezembro 2020).
- IPCC, 2021, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>. Acesso em 16 de dezembro de 2020.
- Juliano, K.A., Giusti, D.A., Muratori, A.M., 2008, Aspectos legais da degradação de solos em áreas de preservação permanente em mineração de areiano médio Iguauçu: *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 905-909, <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200045>.
- Kiernan K., 2010, Human impacts on geodiversity and associated natural values of bedrock hills in the Mekong Delta: *Geoheritage*, 2(3-4): 101-122, <https://doi.org/10.1007/s12371-010-0015-8>.
- Lima, A.O., Tessler, M.G., Turra, A., 2011, Distribuição de lixo ao longo de praias arenosas— Estudo de caso na Praia de Massaguaçu, Caraguatatuba, SP: *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 11(1):75-84, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340132009>.
- Lima C.O., de Oliveira R.C., 2018, Proposta de zoneamento geoambiental para o município de Caraguatatuba-SP: *Geosul*, 33(67): 140-161, <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2018v33n67p140>.
- Macedo Y., Silva E., Oliveira V., Correia J., Medeiros S., Costa D., Cestaro L., 2017, Serviços ambientais das unidades geoambientais no município de São Miguel do Gostoso/RN, Brasil. *GOT: Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, 12: 205-229, [dx.doi.org/10.17127/got/2017.12.009](https://doi.org/10.17127/got/2017.12.009).
- Marnika, E., Christodoulou, E., & Xenidis, A., 2015, Sustainable development indicators for mining sites in protected areas: tool development, ranking and scoring of potential environmental impacts and assessment of management scenarios: *Journal of Cleaner Production*, 101, 59-70, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.098>.

- Mazzucato, E., Bacci, D.C., Souza, C.R.G., Geomorphological heritage on the North Coast of the State of São Paulo: a perspective about current and past climate changes: Geoheritage (Resultados não publicados).
- Mea, M.E.A., 2005, Ecosystems and Human Well-Being: wetlands and water synthesis, <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.358.aspx.pdf>.
- Meira, V. T., 2014, Evolução tectono-metamórfica Neoproterozoica dos complexos Embu e Costeiro no contexto de formação do Gondwana ocidental (leste do estado de São Paulo) [Tese de doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Moura, C.A., 2013, Avaliação de tendência a enchentes das bacias hidrográficas do município de Caraguatatuba (SP): Revista de Geografia (UFPE), 30(2), <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/229012/23414>.
- Mohriak W., Nemčok M., Enciso G., 2008, South Atlantic divergent margin evolution: rift-border uplift and salt tectonics in the basins of SE Brazil: Geological Society, London, Special Publications, 294(1): 365-398, <https://doi.org/10.1144/SP294.19>.
- Mora C.A.S., Campanha G.A.C., Wemmer K., 2013, Microstructures and K-Ar illite fine-fraction ages of the cataclastic rocks associated to the Camburu Shear Zone, Ribeira Belt, Southeastern Brazil: Brazilian Journal of Geology, 43(4):607-622, DOI: 10.5327/Z2317-48892013000400003.
- Moreira, J. C., 2008, Patrimônio geológico em unidades de conservação: atividades interpretativas, educativas e geoturísticas. [Tese de doutorado]: Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Mucivuna, V.C.; Garcia, M.G.M.; Gomes, B.N.; Reynard, E.; Holanda, E.H.; Mattos, C.M.C., 2021, Environmental interpretation and geoheritage in Brazilian protected areas: analysis of the Itatiaia National Park: X International ProGEO symposium, Building connections for global geoconservation. p 229-230, ISBN: 978-84-9138-112-9.
- Narita J., Oehlmeier A.S., Alves F.A., Bortolotte A.C., Basbaum M., Rodrigues T.D., 2013, Results of four-year fauna monitoring in the caraguatatuba-taubaté (gastau) pipeline: Rio Pipeline Conference and Exposition, https://www.academia.edu/4788041/Master_IBP1484_13_RESULTS_OF_FOUR_YEAR_FAUNA_MONITORING_IN_THE_CARAGUATATUBA_TAUBAT%C3%89_GASTAU_PIPELINE_Copyright_2013_Brazilian_Petroleum_Gas_and_Biofuels_Institute_IBP. (Acesso em 11 Novembro de 2020).
- Nascimento M.A.L., da Silva M.L.N., de Moura-Fé M.M., 2020, Os Serviços Ecológicos em Geossítios do Geopark Araripe (CE), Nordeste do Brasil: Anuário do Instituto de Geociências UFRJ. 43:119- 132, https://doi.org/10.11137/2020_4_119_132.
- Nellemann, C., Corcoran, E. (Eds.), 2009, Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon: a rapid response assessment: UNEP/Earthprint, https://ccom.unh.edu/sites/default/files/publications/Nellemann_2010_BlueCarbon_book.pdf.
- Nieto L.M., 2001, Geodiversidad: propuesta de una definición integradora: Boletín Geológico y minero, 112(2):3-12, http://asgmi.igme.es/Boletin/2001/112_2-2001/1-ARTICULO%20%20GEODIVERSIDAD.pdf. (Acesso em 3 Dezembro de 2020).
- Okida, R., Veneziani, P., 1998, O Sensoriamento Remoto como Alternativa no Estudo de Áreas de Inundação: um exemplo na região de Caraguatatuba (SP), http://marte.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.09.15.45/doc/1_79p.pdf.
- Paes, S.R., 1998, Espaço da vida, espaço da morte na trajetória caiçara, <https://nupaub.fflch.usp.br/sites/nupaub.fflch.usp.br/files/Silvia%20Regina%20Paes.pdf>.
- Pan, X., Shi, P., & Wu, N., 2020, Spatial–Temporal Interaction Relationship between Ecosystem Services and Urbanization of Urban Agglomerations in the Transitional Zone

- of Three Natural Regions: Sustainability, 12(23), 10211, <https://doi.org/10.3390/su122310211>.
- Peixoto P., 2010: Peixoto (Org.). Geodiversidade do Estado de São Paulo. São Paulo: CPRM. <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/16776>. (Acesso em 3 Dezembro de 2020).
- Pellegatti, C.H G., Galvani, E., 2010, Avaliação da precipitação na Serra do Mar–SP em eventos de diferentes intensidade e duração: GEOUSP Espaço e Tempo (Online), 14(1), 147-158, <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2010.74160>.
- Pereira, B.S., 2017, Verticalização da Avenida Prefeito Geraldo Nogueira da Silva, município de Caraguatatuba – SP. [Trabalho de Graduação Individual]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas.
- Pereira DI, Pereira P, Brilha J, Santos L, 2013, Geodiversity Assessment of Paraná State (Brazil): Na Innovate Approach: Environmental Management 52: 541-552, <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>.
- Perrotta et al., 2005, Mapa geológico do Estado de São Paulo. Brasília, CPRM, escala 1:750.000.
- Perotti, L., Carraro, G., Giardino, M., De Luca, D. A., & Lasagna, M., 2019, Geodiversity evaluation and water resources in the Sesia Val Grande UNESCO Geopark (Italy): Water, 11(10), 2102, <https://doi.org/10.3390/w11102102>
- Petrobras, <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/unidade-de-caraguatatuba-completa-5-anos-com-marca-historica-de-producao-de-gas.htm>. (Acesso em 15 dezembro 2020).
- Queiroz, D. S., Garcia, M. G. M., 2022, The “hidden” geodiversity in the traditional approaches in ecosystem services: a perspective based on monetary valuation: Geoh Heritage, (14):44, <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00676-x>.
- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R., & Feizizadeh, B. 2017, Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework: Science of the Total Environment, 579, 913-927, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.176>.
- Ramos M.A.B, Dantas M.E., Maia M.A.M., Machado M., Pfaltzgraff P.A., Ambrosio M.F., Osório C, 2018, Proposta Metodológica para Levantamento da Geodiversidade em escalas 1: 100 000 a 1: 50 000 em Regiões Metropolitanas. Projeto Geodiversidade. Departamento de Gestão Territorial, CPRM, <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21731>. (Acesso em 3 Dezembro de 2020).
- Reverte F.C., Garcia M.G.M., Brilha J., Pellejero A.U., 2020, Assessment of impacts on ecosystem services provided by geodiversity in highly urbanised areas: A case study of the Taubaté Basin, Brazil: Environmental Science & Policy, 112:91-106, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.05.015>.
- Riccomini, C., 1989, O Rift Continental do sudeste do Brasil. [Tese de doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 10.11606/T.44.1990.tde-18032013-105507.
- Rodrigues F.H., 2018, Estudo da geodiversidade da região norte da Ilha de São Sebastião (SP): uma proposta de mapeamento geoambiental aplicado à estratégia de geoconservação, [Tese de doutorado]: Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, <http://hdl.handle.net/11449/152822>.
- Rosembach, R., 2013, Levantamento da atividade urbana nas adjacências do Parque Estadual da Serra do Mar-municípios de São Sebastião, Caraguatatuba e Ubatuba, SP, <http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.29.00.56.19/doc/p1495.pdf>.
- Ross J.L.S., 1992, O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo: Revista do departamento de Geografia, 6:17-29, <https://doi.org/10.7154/RDG.1992.0006.0002>.
- Ross J.L.S., Moroz I.C., 1996, Mapa geomorfológico do estado de São Paulo: Revista do

- Departamento de Geografia, 10:41-58, Doi: 10.7154/RDG.1996.0010.0004.
- Rossi M., 2017, Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, V.1. 118p. (inclui Mapas). ISBN: 978-85-64808-16-4. https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/wp-content/uploads/sites/234/2017/11/Livro_Solos1.pdf. (Acesso em 20 Dezembro de 2020).
- Santos D.S., Mansur K.L., Gonçalves J.B., Junior E.R.A., 2017, Quantitative assessment of geodiversity and urban growth impacts in Armação dos Búzios, Rio de Janeiro, Brazil: *Applied geography*, 85: 184-195, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.03.009>.
- Santos D.S., Mansur K.L., de Arruda Jr E.R., Dantas M.E., Shinzato E., 2019, Geodiversity Mapping and Relationship with Vegetation: A Regional-Scale Application in SE Brazil: *Geoheritage*, 11(2): 399-415, <https://doi.org/10.1007/s12371-018-0295-y>.
- São Paulo, 2008, Secretaria do Meio Ambiente, Plano de Manejo do Parque Estadual da Serra do Mar. São Paulo: Instituto Florestal.
- São Paulo, 2012, Iritani, M. A., Ezaki S. As águas subterrâneas do estado de São Paulo. Cadernos de educação ambiental. Governo do estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto geológico.
- São Paulo, 2019, Parque Estadual Serra do Mar Caraguatatuba. <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/pesm/nucleos/caraguatatuba/>. (Acesso em 10 Dezembro de 2020).
- Secron M.B., Hurtado S.N., Medeiros S.S., de Oliveira W.J., 2008, Preliminary Environmental Assessment for the site selection for the UTGCA (Gas Treatment Unit for Caraguatatuba-SP): 7th International Pipeline Conference, <http://dx.doi.org/10.1115/IPC2008-64244>.
- Serrano E, Ruiz-Flaño P., 2007, Geodiversity: a theoretical and applied concept: *Geographica Helvetica*, 62(3): 140-147, <https://doi.org/10.5194/gh-62-140-2007>.
- Silva C.R., Dantas M.E., 2010, Mapas geoambientais, http://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/17873/1/mapas_geoambientais_sbcgg.pdf. (Acesso em 3 Dezembro de 2020).
- Silva, S.D., Braga, F.A., Fonseca, A.R., 2010, Análise de conflito entre legislação e uso da terra no município de Itabira-MG: *Caminhos da Geografia*, 11934), 131-144, <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/16077>.
- Silva M.L.N., do Nascimento M.A.L., 2020, Ecosystem Services and Typology of Urban Geodiversity: Qualitative Assessment in Natal Town, Brazilian Northeast: *Geoheritage*, 12(3): 1-16, <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00479-y>.
- Silveira E.A., 2015, Caracterização dos fluxos energéticos e gases de efeito estufa em instalações “offshore”, [Dissertação de mestrado]: Brasília, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, <http://dx.doi.org/10.26512/2015.03.D.18426>.
- Soms J., 2017, Assessment of geodiversity as tool for environmental management of protected nature areas in South-Eastern Latvia: *Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference. Volume I (Vol. 271, p. 277)*, <https://doi.org/10.17770/etr2017vol1.2581>.
- Souza C.R.G., 1992, Considerações sobre a origem de um depósito marinho pleistocênico no litoral norte do Estado de São Paulo: *Boletim IG-USP. Série Científica*, 23: 43-54, <https://doi.org/10.11606/issn.2316-8986.v23i0p43-54>.
- Souza, C. R. D. G., 1997, As células de deriva litorânea e a erosão nas praias do Estado de São Paulo [Tese de doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Oceanografia.
- Souza, C.R.G., Suguio, K., Oliveira, A.M.S., Oliveira, P.E., 2005, Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto: Holos, Editora. 382p.: il.; 28, <https://www.abequa.org.br/livro.php>

- Souza, C.R.G., 2005a, Suscetibilidade morfométrica de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações em áreas costeiras: *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 6(1), <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v6i1.38>.
- Souza C.R., Luna G.C., 2008, Unidades quaternárias e vegetação nativa de planície costeira e baixa encosta da Serra do Mar no litoral norte de São Paulo: *Revista do Instituto Geológico*, 29(1-2): 1-18, <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.20080001>.
- Souza C.R., 2009, A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil: *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 9(1): 17-37, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340125003>.
- Souza C.R.G., Luna G.D.C., 2010, Variação da linha de costa e balanço sedimentar de longo período em praias sob risco muito alto de erosão do município de Caraguatatuba (Litoral Norte de São Paulo, Brasil): *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10(2): 179-199. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340129002>. (Acesso em 15 Dezembro de 2020).
- Souza, C.R.G., 2012, Praias arenosas oceânicas do estado de São Paulo (Brasil): síntese dos conhecimentos sobre morfodinâmica, sedimentologia, transporte costeiro e erosão costeira: *Revista do Departamento de Geografia*, 308-371, <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0112.0014>.
- Schrodt F., et al., 2019, Opinion: To advance sustainable stewardship, we must document not only biodiversity but geodiversity: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 116, n. 33, p. 16155-16158, <https://doi.org/10.1073/pnas.1911799116>.
- Sharples C., 2002, Concepts and principles of geoconservation: *Tasmanian Parks & Wildlife Service*, Hobart.
- Shrestha, O. M., Koirala, A., Hanisch, J., Busch, K., Kerntke, M., & Jäger, S., 1999, A geo-environmental map for the sustainable development of the Kathmandu Valley, Nepal: *GeoJournal*, 49(2), 165-172, <https://www.jstor.org/stable/41147413>.
- Steiner, N. S., Bowman, J., Campbell, K., Chierici, M., Eronen-Rasimus, E., Falardeau, M., ... & Wongpan, P., 2021, Climate change impacts on sea-ice ecosystems and associated ecosystem services: *Elem Sci Anth*, 9(1), 00007, <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00007>.
- Stewart, I. S., Gill, J. C., 2017, Integrating sustainability concepts into Earth Sciences: *Proceedings of Geologists Association*. (128), 165-172, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pgeola.2017.01.002>.
- Tansley, A.G., 1935, The use and abuse of vegetational concepts and terms *Ecology* 16, 284—307: *Progress in Physical Geography*, 31(5), 517-522, <http://dx.doi.org/10.1177/0309133307083297>.
- Terassi, P.M.B., Galvani, E., 2017, O efeito orográfico da Serra do Mar e o potencial erosivo das chuvas nas bacias hidrográficas do Ribeira e Litorânea-Paraná: *Revista Brasileira de Climatologia*, 21, <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v21i0.47621>.
- Tognetto, F., Perotti, L., Viani, C., Colombo, N., & Giardino, M., 2021, Geomorphology and geosystem services of the Indren-Cimalegna area (Monte Rosa massif–Western Italian Alps): *Journal of Maps*, 17(2), 161-172, <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.1898484>.
- Tupinambá, M., Heilbron, M., Duarte, B. P., Nogueira, J. R., Valladares, C., Almeida, J., ... & Ludka, I., 2007, *Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí*: Geonomos.
- Turra, A., Petracco, M., Amaral, A.C.Z., Denadai, M.R., 2014, Temporal variation in life-history traits of the clam *Tivela mactroides* (Bivalvia: Veneridae): Density-dependent processes in sandy beaches: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 150, 157-164, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2013.06.004>.

- UNEP-WCMC and IUCN, 2022, Protected Planet: The World Database on Protected Areas (WDPA) and World Database on Other Effective Area-based Conservation Measures (WD-OECM) [Online], January 2022, Cambridge, UK: UNEP-WCMC and IUCN, Available at: www.protectedplanet.net.
- Van Ree, C.C.D.F., Van Beukering, P.J.H., Boekstijn, J., 2017, Geosystem services: A hidden link in ecosystem management: *Ecosystem services*, 26, 58-69, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.05.013>.
- Vegas, J., Mata, P., Sánchez España, J., Morellón, M., Salazar, A., Rodríguez, J. A., Valero-Garcés, B., Carcavilla, L., 2015, Evolución del estado de conservación de lugares de interés geológico sometidos a modificaciones antrópicas. 2015: Hilario, A., Mendiá, M., Monge-Ganuza, M., Fernández, E., Vegas, J., Belmonte, A. (eds) *Patrimonio geológico y geoparques, avances de um caminho para todos*. Cuadernos del Museo Geominero, nº 18. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 2015, ISBN 978-84-7840-962-4.
- Worboys G.L., Lockwood M., Kothari A., Feary S., Pulsford I (eds), 2015, *Protected Areas Governance and Management*, ANU Press, Canberra, <http://doi.org/10.22459/PAGM.04.2015>.
- Zoneamento Ecológico Econômico Setor Costeiro do Litoral Norte de São Paulo – Caraguatatuba. 1: 50. 000, 2017, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA/ Coordenadoria de Planejamento Ambiental (CPLA). Grupo setorial de coordenação do Litoral Norte. <http://s.ambiente.sp.gov.br/zee/CARAGUATATUBA.pdf>. (Acesso em 15 Dezembro de 2020).
- Zwolinski Z., Najwer A., Giardino M., 2018, *Methods for Assessing Geodiversity*: Reynard E, Brilha J. *Geoheritage: Assessment, Protection, and Management*: Elsevier. p. 27-46.