

RAPHAEL WAKIN DE ARAÚJO

**MODELAGEM GEOAMBIENTAL DO PARQUE NACIONAL DA SERRA DO
GANDARELA (MG): INTERAÇÕES SOLO, RELEVO E VEGETAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para
obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Carlos Ernesto G. Reynaud Schaefer

Coorientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A663m
2021 Araújo, Raphael Wakin de, 1979-
Modelagem geoambiental do Parque Nacional da Serra do
Gandarela (MG) : interações solo, relevo e vegetação / Raphael
Wakin de Araújo. – Viçosa, MG, 2021.
118 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Biodiversidade - Conservação. 2. Geologia.
3. Aprendizado do computador. 4. Modelos matemáticos.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos e
Nutrição de Plantas. Programa de Pós-Graduação em Solos e
Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 333.95

Bibliotecário(a) responsável: Renata de Fatima Alves CRB6/2578

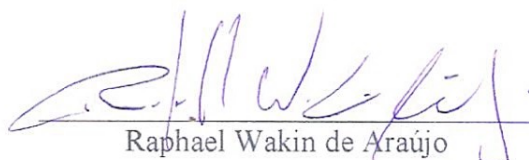
RAPHAEL WAKIN DE ARAÚJO

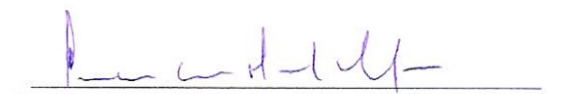
**MODELAGEM GEOAMBIENTAL DO PARQUE NACIONAL DA SERRA DO
GANDARELA (MG): INTERAÇÕES SOLO, RELEVO E VEGETAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para
obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 04 de junho de 2021.

Assentimento:


Raphael Wakin de Araújo
Autor


Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer
Orientador

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo apoio durante esta caminhada.

À Universidade Federal de Viçosa, por todas as oportunidades.

A todos os meus amigos, meus colegas de trabalho, funcionários e professores do Departamento de Solo e Nutrição de Plantas. Sem vocês este trabalho não seria possível.

Ao meu Orientados Carlos Ernesto G.R. Schaefer, pelos ensinamentos, pelo apoio e pela paciência em momentos cruciais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

A empresa Amplo Engenharia pelo apoio logístico durante os trabalhos de campo.

RESUMO

ARAÚJO, R.W., D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2021. **Modelagem Geoambiental do Parque Nacional da Serra do Gandarela (MG): Interações Solo, Relevo e Vegetação.** Orientador: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer. Coorientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

O presente trabalho teve como objeto de estudo o Parque Nacional da Serra do Gandarela (PARNA-SG), região de geologia diversa e complexa dentro do Quadrilátero Ferrífero. A grande diversidade abiótica do parque é acompanhada de uma grande diversidade dos recursos bióticos, sendo uma área de transição entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado. A paisagem local é formada por um mosaico de fitofisionomias florestais, savânicas e campestres, e de forma complementar, associados aos afloramentos de canga, itabirito e quartzito, ocorrem os Campos Rupestres. São ambientes únicos no território brasileiro, que abrigam um elevado número de espécies raras e endêmicas numa porção territorial muito reduzida. No PARNA-SG ocorrem os divisores entre as bacias do Rio das Velhas e do Rio Piracicaba, importantes na captação de grande parte da água que abastece a Região Metropolitana de Belo Horizonte. Diante deste contexto, este trabalho estruturado em três capítulos, buscou entender a distribuição e a diversidade geoambiental do parque e suas relações com os fatores edáficos de cada ambiente. Propôs uma metodologia capaz de gerar índices de geodiversidade espacializados de forma automática, o que permitiu analisar as relações entre geodiversidade e a biodiversidade intrínseca dos geoambientes em cada bioma, possibilitando o uso deste método como base inicial para o delineamento de áreas prioritárias para a conservação dentro do parque. Testou-se também uma nova metodologia, que utilizou modelos de Machine Learning para a classificação automática dos geoambientes. Os resultados obtidos, mesmos com a necessidade de futuros refinamentos, podem ser considerados promissores para mapeamento de unidades geoambientais.

Palavras-chave: Geobiodiversidade. Conservação. Modelagem.

ABSTRACT

ARAÚJO, R.W., D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June 2021. **Geoenvironmental Modeling of the Serra do Gandarela National Park (MG): Soil, Relief and Vegetation Interactions.** Adviser: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer. Co-adviser: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

The present work had as object of study the Serra do Gandarela National Park (PARNA-SG), a region of diverse and complex geology within the Quadrilátero Ferrífero. The great abiotic diversity of the park is accompanied by a great diversity of biotic resources, being an area of transition between the Atlantic Forest and Cerrado biomes. The local landscape is formed by a mosaic of forest, savanna and fields vegetation, and in a complementary way, associated with the outcrops of canga, itabirite and quartzite, occur the Campos Rupestres. They are unique environments in the Brazilian territory, home to a high number of rare and endemic species in a very small territorial portion. The PARNA-SG holds the Rio das Velhas and Rio Piracicaba basins, which are important in capturing much of the water that supplies in the Metropolitan Region of Belo Horizonte. Given this context, this work, structured in three chapters, sought to understand the geoenvironmental distribution and diversity of the park and its relationship with the edaphic factors of each environment. It was proposed a methodology capable of generating spatialized geodiversity indexes automatically, which allowed the evaluation of the relationships between geodiversity and the intrinsic biodiversity of geoenvironments in each biome, enabling the use of this method as an initial basis for the design of priority areas for conservation within the park. A new methodology which uses Machine Learning models for the automatic classification of geoenvironments was also tested, and the results obtained, even with the need for future refinements, can be considered promising for mapping geoenvironmental units.

Keywords: Geobiodiversity. Conservation. Modeling.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	9
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	11
CAPÍTULO 1	13
GEOAMBIENTES E SOLOS DO PARQUE NACIONAL DA SERRA DO GANDARELA, MINAS GERAIS, BRASIL: SUBSIDIO A CONSERVAÇÃO DA GEOBIODIVERSIDADE.	13
RESUMO	14
ABSTRACT	15
1. INTRODUÇÃO.....	16
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
2.1. Caracterização da Área de Estudo	19
2.2. Individualização e Quantificação dos Geoambientes do Parque Nacional da Serra do Gandarela.....	20
2.3. Levantamento, Caracterização e Classificação dos Solos	21
2.4. Análises Estatísticas	22
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4. CONCLUSÕES	40
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
CAPÍTULO 2	46
GEOBIODIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE DO PARQUE NACIONAL DA SERRA DO GANDARELA, MINAS GERAIS, BRASIL: UMA METODOLOGIA DE DIÁLOGO.	46
RESUMO	47
ABSTRACT	48
1. INTRODUÇÃO.....	49
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	51
2.1. Caracterização da Área de Estudo	51

2.2. Base de Dados e Tratamentos Utilizados no Cálculo dos Índices de Geodiversidade	53
2.3. Cálculo e Espacialização dos Índices de Geodiversidade	54
2.4. Definição da Janela Movel Mais Adequada	57
2.5. Análise da Relação Geoambiente / Geodiversidade no PARNA-SG.....	58
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
3.1. Avaliação do método e definição da melhor janela.....	60
3.2. Relação Geoambiente/Geodiversidade no PARNA-SG.....	67
4. CONCLUSÕES	73
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
CAPÍTULO 3	78
MODELAGEM PARA MAPEAMENTO DOS GEOAMBIENTES DO PARQUE NACIONAL DA SERRA DO GANDARELA, MINAS GERAIS, BRASIL.	78
RESUMO	79
MODELING FOR MAPPING THE GEOENVIRONMENTS OF THE SERRA DO GANDARELA NATIONAL PARK, MINAS GERAIS, BRAZIL.	80
ABSTRACT	80
1. INTRODUÇÃO.....	81
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	84
2.1. Caracterização da Área de Estudo	84
2.2. Metodologia de modelagem e predição de Geoambientes	85
2.3. Análise comparativa entre os mapas gerados por modelagem e o mapeamento tradicional dos geoambientes do PARNA-SG.....	93
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
3.1. Kappa e Acurácia.....	95
3.2. Análise de importância das variáveis	97
3.3. Análise comparativa entre os mapas gerados por modelagem e o mapeamento tradicional dos geoambientes do PARNA-SG.....	102
3.4. Análise do Variety Normalizado (VN).....	104
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

CONCLUSÕES GERAIS	118
-------------------------	-----

INTRODUÇÃO GERAL

Uma sociedade próspera precisa buscar o equilíbrio entre as bases do seu desenvolvimento e a conservação dos recursos que sustentam o seu progresso. Os processos de urbanização, o avanço das fronteiras agrícolas e da mineração, assim como o consumo crescente de bens e serviços geradores de poluentes, têm impactado a vida do homem e dos demais seres vivos em todo o planeta. A diminuição da biodiversidade em um ritmo cada vez mais acelerado, traz prejuízos irreversíveis para os ecossistemas, que continuam tendo suas áreas reduzidas e se tornam cada vez menos resilientes. Para cada dez mil espécies que se extinguem, somente uma nova espécie chega a evoluir (CHAPIN et al., 1998), dessa forma, a velocidade de perda da biodiversidade atual supera amplamente a velocidade com que a natureza consegue efetuar uma compensação e se adaptar (JONSSON, 2011).

A concepção de biodiversidade dentro de um ecossistema, representa relações complexas entre os organismos vivos e os ativos não vivos que compõem a base dos recursos naturais e que são responsáveis por criar as oportunidades que sustentam a vida em todo o planeta (ALHO, 2012). Para Santucci (2005), existe uma relação intrínseca entre diversidade biológica e diversidade geológica, sendo o alicerce geológico a base dos ecossistemas, e os solos a ligação entre os mundos abiótico e biótico. Neste sentido é preciso reconhecer que a diversidade abiótica é tão vasta quanto importante em relação à biodiversidade. Para Gray (2004), a "Geodiversidade" é o conjunto natural (diversidade) dos fatores geológicos (rochas, minerais e fósseis), geomorfológicos (relevo e processos) e pedológicos (características do solo), portanto, o equivalente abiótico da biodiversidade.

No eixo central do Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, em boas condições de preservação, encontra-se a Serra do Gandarela. Ela é formada por um sinclinal em formato de ferradura, que integra um platô laterítico residual, erguido em sua posição atual

após longos períodos erosivos das rochas adjacentes circundantes, que permitiu a inversão da paisagem local. A Serra do Gandarela está inserida em um ecótono, onde remanescentes de Mata Atlântica e formações do bioma Cerrado coexistem com Campos Rupestres (sobre canga, itabirito e quartzito), presentes nos afloramentos rochosos e de canga, comuns nesta região.

Esta paisagem exuberante é composta por um grande mosaico geoambiental, orquestrado pelos fatores abióticos (geologia, geomorfologia e pedologia), fortemente relacionados as características e distribuição das fitofisionomias integrantes deste sistema. A grande diversidade de ambientes, comum nas áreas de transição entre biomas distintos, e muito evidente na Serra do Gandarela, está diretamente relacionada à riqueza de espécies e à elevada diversidade biológica local (ICMBIO, 2010).

Uma análise da paisagem por meio de métodos geossistêmicos, buscando acima de tudo uma visão integrada e aplicada do meio ambiente, têm a capacidade analítica dos processos naturais responsáveis pela organização dos elementos da paisagem. Baseado na Teoria Geral dos Sistemas de Bertalanffy (1950), o russo Victor Sotchava, no início da década de 1960, introduziu o termo geossistema à literatura soviética e estabeleceu uma metodologia de estudos da natureza/paisagem com aplicações aos estudos geográficos. Procurou uma proposta metodológica que substituísse os estudos fundamentados exclusivamente na dinâmica biológica do ecossistema, por estudos integrados dos sistemas naturais e humanos no tempo e no espaço (NEVES *et al.*, 2014). Diversos autores como por exemplo os franceses Bertrand, (1968, 1971) e Tricart, (1965, 1977, 1982), e o brasileiro Troppmair, (1983, 2000, 2004), também se destacaram nos estudos geossistêmicos, em suas próprias linhas metodológicas, voltadas para o objetivo de seus trabalhos e a realidade local dos ambientes onde suas pesquisas foram desenvolvidas.

Diante de todo o contexto apresentado, este trabalho escolheu o Parque Nacional da Serra do Gandarela (PARNA-SG) como objeto de estudo, buscando entender a diversidade geoambiental desta zona ecotonal com altíssima diversidade de recursos físicos e biológicos. Esta tese está apresentada em três capítulos distintos, com o objetivo de: i) investigar as relações geoambientais e pedológicas entre os geossistemas; ii) entender a distribuição da geodiversidade e sua relação com os geoambientes de cada bioma do parque; e iii) testar uma nova metodologia para a classificação automática de geoambientes através do uso de técnicas de Machine Learning.

No primeiro capítulo, utilizou-se o substrato geológico como base para a separação de três geossistemas principais (Ferruginoso, Quartzítico e Metapelítico), a partir destes, em nível hierárquico inferior foram separados 17 geoambientes distintos. Os solos superficiais de cada um dos geoambientes foram coletados e submetidos a análises físicas e químicas, com o intuito de melhor entender as relações entre os geoambientes e geossistemas do PARNA-SG e suas características edáficas. Todos os geoambientes foram mapeados e tiveram suas áreas quantificadas.

O segundo capítulo tratou da criação de um método, utilizando técnicas adaptadas de sensoriamento remoto, capazes de calcular automaticamente índices de geodiversidade para toda a área de estudo. Os índices calculados foram usados para investigar as relações entre a distribuição dos geoambientes de cada bioma do PARNA-SG e a distribuição dos índices de geodiversidade.

E finalmente, o terceiro capítulo, onde foi testado um novo método para a classificação automática dos geoambientes do PARNA-SG, utilizando técnicas de machine learning, onde foram avaliadas as performances de 5 modelos matemáticos diferentes para duas situações específicas de classificação supervisionada para 9 e 5 classes de geoambientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALHO, Cleber J. R. Importância da biodiversidade para a saúde humana: uma perspectiva ecológica. *Estud. av.*, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 151-166, 2012. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010340142012000100011&lng=en&nrm=iso>. access on 29 Mar. 2021. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142012000100011>.

BERTRAND, G. Paisagem e Geografia Física global: esboço metodológico. *Caderno de Ciências da Terra*. n.13. São Paulo, 1971. 27p.

BERTRAND, G. Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-ouest*, Toulouse, v. 39, n. 3, p. 249-272, 1968.

CHAPIN III FS, SALA OE, BURKE IC, GRIME JP, HOOPER DU, LAUENROTH WK, LOMBARD A, MOONEY HA, MOSIER AR, NAEEM S, PACALA SW, ROY J,

STEFFEN WL, TILMAN D (1998) Ecosystem consequences of changing biodiversity: experimental evidence and a research agenda for the future. *Bioscience* 48: 45-52.

GRAY, M. (2004). Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature.

ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Proposta de Criação do Parque Nacional Serra do Gandarela. Setembro, 103p., 2010.

JONSSON, M. (2011). Perda de Biodiversidade e Funcionamento dos Ecossistemas. *ECOLOGIA.INFO* 30.

NEVES, Carlos & MACHADO, Gilnei & HIRATA, Carlos & STIPP, Nilza. (2014). A importância dos geossistemas na pesquisa geográfica: uma análise a partir da correlação com o ecossistema. *Sociedade & Natureza (Online)*. 26. 271-285. 10.1590/1982-451320140206.

SANTUCCI, V. L. 2005. Historical Perspectives on Biodiversity and Geodiversity. The George Wright Forum, USA. *Geodiversity & Geoconservation*, 22 (3): p.29-34.

SOTCHAVA, V. B. Definition de Quelques Notions et Termes de Géographie Physique. *Institute de Geographie de la Sibirie et Extrem Orient*. n. 3, 1962.

SOTCHAVA, V. B. O Estudo de Geossistemas. Métodos em Questão. São Paulo. n. 16, p. 1-52, 1977.

TRICART, J. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: SUPREN, 1977

TRICART, J. Paisagem e ecologia. *Inter-Facies: escritos e documentos*. São José do Rio Preto: Ed. Da UNESP, 1982.

TRICART, J. *Principés et méthodes de la Géomorphologie*. Paris: Masson, 1965.

TROPPEMAIR, H. Biogeografia e Sistemas: sistemas urbanos. In: *Biogeografia e Meio Ambiente*. 6. ed, Rio Claro: UNESP, 2004.

TROPPEMAIR, H. Ecossistemas e geossistemas do estado de São Paulo. *Boletim de Geografia Teorética*. Rio Claro. v. 13, n. 25, 1983.

TROPPEMAIR, H. *Geossistemas e geossistemas paulistas*. Rio Claro: UNESP, 2000.

CAPÍTULO 1

GEOAMBIENTES E SOLOS DO PARQUE NACIONAL DA SERRA DO GANDARELA, MINAS GERAIS, BRASIL: SUBSIDIO A CONSERVAÇÃO DA GEOBIODIVERSIDADE.

**GEOAMBIENTES E SOLOS DO PARQUE NACIONAL DA SERRA DO
GANDARELA, MINAS GERAIS, BRASIL: SUBSIDIO A CONSERVAÇÃO DA
GEOBIODIVERSIDADE.**

RESUMO

O presente trabalho buscou entender a distribuição e a diversidade geoambiental do Parque Nacional da Serra do Gandarela, investigando os atributos físicos, químicos e morfológicos dos solos relacionados aos geoambientes do parque. Baseado no substrato geológico, foram separados três geossistemas principais dentro da área estudada: Ferruginoso, Metapelítico e Quartzítico. Em ordem hierárquica inferior aos geossistemas foram mapeados 17 geoambientes, sendo estes estratificados a partir do meio físico em função da geologia, do relevo, dos tipos de vegetação, e dos solos nos compartimentos da paisagem. Os solos foram devidamente amostrados em cada unidade geoambiental e submetidos a análises físicas e químicas de rotina. Os resultados foram estaticamente analisados, e mostraram diferenças significativas entre os solos dos geoambientes dos três geossistema. Os geoambientes ferruginosos mostraram ser influenciado principalmente pelas variáveis químicas MO, T e H + Al e pelas variáveis físicas argila e areia grossa. Os geoambientes com formações do Cerrado pertencentes ao geossistema metapelítico mostraram maior relação com as variáveis P-rem e pH. A variável Al³⁺ se mostrou mais relevante nos geoambientes florestais metapelíticos e no Capão Alto quartzítico. Nos demais geoambientes quartzíticos as variáveis P-rem e pH tiveram maior importância, e de forma geral, areia grossa e areia fina foram as principais variáveis físicas em todos os geoambientes quartzíticos. Há, portanto, um importante controle edáfico na estratificação da paisagem na Serra do Gandarela, com implicações na conservação da geobiodiversidade.

Palavras-chave: Geoambiente. Solos. Diversidade.

ABSTRACT

The present work sought to understand the geoenvironmental distribution and diversity of the Serra do Gandarela National Park, investigating the physical, chemical and morphological attributes of the soils related to the park's geoenvironments. Based on the geological substrate, three main geosystems were separated within the studied area: Ferruginous, Metapelitic and Quartzitic. In a hierarchical order below the geosystems, 17 geoenvironments could be mapped, and were stratified from the physical environment according to geology, relief, types of vegetation, and soils in the landscape compartments. The soils were duly sampled in each geoenvironmental unit and subjected to physical and chemical analyzes. The results were statistically analyzed showing significant differences between the soils of the geoenvironments of the three geosystems. The ferruginous geoenvironments showed to be influenced mainly by the variables MO, T, H + Al and by the physical variables clay and coarse sand. The geoenvironments with formations from the Cerrado biome belonging to the metapelitic geosystem, have a better relationship with the variables P-rem and pH. The variable Al³⁺ proved to be more relevant in metapelitic forested geoenvironments and in the Capão Alto quartzitic. In the other quartzite geoenvironments, the variables P-rem and pH shown to be more relevant, and in general, coarse sand and fine sand were the main physical variables in all quartzite geoenvironments. Therefore, there is an important edaphic control in the stratification of the landscape in Serra do Gandarela, with implications for the conservation of geobiodiversity.

Key-words: Geoenvironment. Soil. Diversity.

1. INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QF), com cerca de 7200 km², apresenta uma estrutura geológica antiga e complexa, reconhecida principalmente pelas rochas proterozóicas ricas em minério de ferro da Formação Cauê (Grupo Itabira – Supergrupo Minas). Esta formação geológica de idade Pré-Cambriana exerce forte controle estrutural sobre o relevo regional, devido à grande resistência a erosão de suas litologias, criando uma paisagem de serras, sobre o qual se desenham formações vegetais singulares, com alta taxa de diversidade e espécies endêmicas.

No eixo central do QF, em boas condições de preservação, a Serra do Gandarela (SG) é formada por uma extensa sinclinal, que conforma um platô laterítico residual, soerguido para sua posição atual após longos períodos erosivos das rochas adjacentes circundantes. A SG apresenta ampla representação de remanescentes de Mata Atlântica e Campos Rupestres (sobre canga, itabirito e quartzito), que coexistem em mosaico com formações de Cerrado, presentes nas áreas rebaixadas que circundam a serra, destacando a forte natureza ecotonal da região.

A diversidade de ambientes, comum nas áreas de transição entre biomas distintos (Mata Atlântica e Cerrado) está diretamente relacionada à riqueza de espécies e à elevada diversidade biológica da SG (ICMBIO, 2010). Segundo Silveira *et al.* (2016) os campos rupestres comportam mais de 5000 espécies de plantas vasculares, 14% da diversidade em 1% da superfície do país. A SG representa ainda a mais importante área de recarga de aquíferos do QF, e relevante fonte de abastecimento de água da região metropolitana de Belo Horizonte (ANA, 2010).

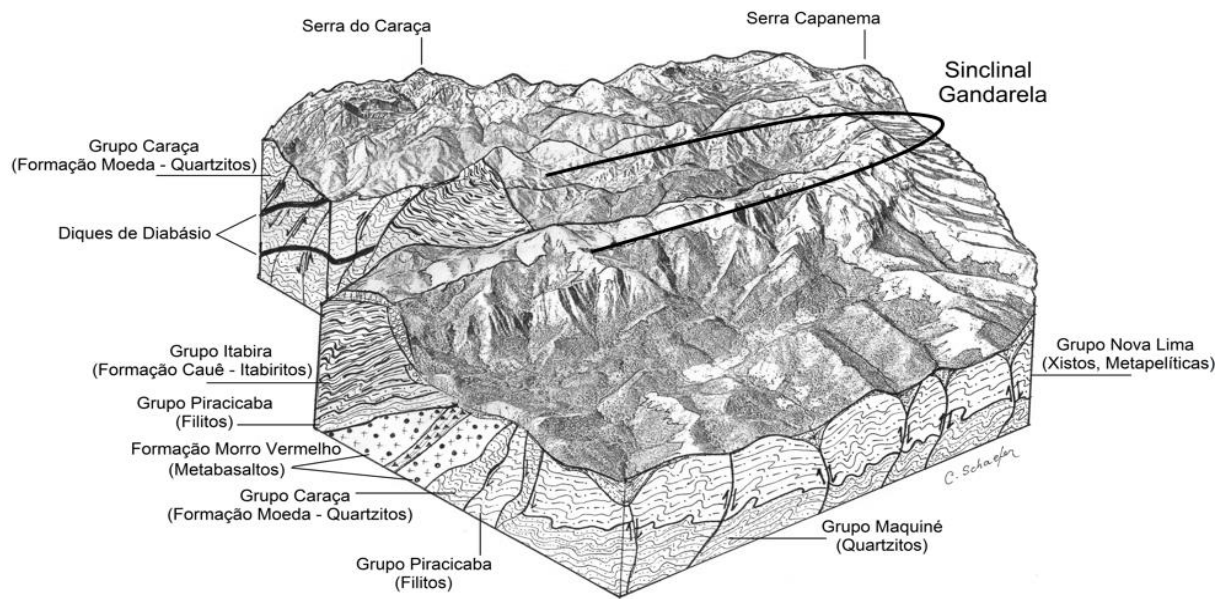


Figura 1 - Bloco diagrama ilustrativo de relevo e litologias da Serra do Gandarela, destacando a sequência de rochas e suas relações estratigráficas e geomorfológicas (SCHAEFER *et al*, 2019).

O intuito de preservar partes estratégicas do patrimônio biológico, geológico, espeleológico e hidrológico associado às formações de canga do Quadrilátero Ferrífero (campos rupestres, remanescentes de floresta, as áreas de recarga de aquíferos e o conjunto cênico da paisagem regional) (ISA, 2015), fez com que o ICMBio desenvolvesse estudos que culminaram com a criação do Parque Nacional da Serra do Gandarela (PARNA-SG) em 2014. O parque abrange parte do Sinclinal Gandarela em sua porção central, e também cobre outras áreas adjacentes com características geológica e geomorfológicas distintas, de grande diversidade de ambientes. Além de preservar o patrimônio natural, a criação do PARNA-SG garante uma série de funções e serviços ecossistêmicos, cujos benefícios já são desfrutados pela sociedade. A proteção de nascentes e mananciais que alimentam reservatórios de abastecimento de água, e a mitigação da emissão de dióxido de carbono pelas áreas protegidas são alguns dos serviços proporcionados por estas áreas protegidas (MEDEIROS *et al.*, 2011), embora poucos estudos tenham efetivamente quantificado e mensurado esses ativos.

Os recursos geológicos e os processos a eles associados mantêm relações estreitas com os recursos bióticos e biosistemas. Estas integrações ocorrem através dos ecossistemas, comunidades, espécies, organismos, e a nível celular e genético (SANTUCCI, 2005).

A análise integrada da paisagem do PARNA-SG por meio do método de análise geossistêmica, utiliza elementos da Teoria Geral dos Sistemas (Bertalanffy, 1950) e tem a capacidade analítica dos processos naturais responsáveis pela organização dos elementos da paisagem. Para Sotchava (1977), os geossistemas são sistemas territoriais naturais, que se distinguem no envoltório geográfico, em diversas ordens dimensionais e são constituídos de componentes naturais intercondicionados e interrelacionados em sua distribuição e se desenvolvem no tempo, como parte do todo, DIAS e SANTOS (2007) descrevem esta visão dos geossistemas como a combinação entre os fatores geológicos, climáticos, geomorfológicos, hidrológicos e pedológicos em associação com os fatores biológicos e antrópicos. Desta forma, ao se avaliar o arcabouço geológico do PARNA-SG, podem ser definidos três geossistemas principais, onde há o predomínio dos seus respectivos substratos geológicos: Ferruginoso, Quartzítico e Metapelítico. Dentro destes, em nível hierárquico inferior, foram identificados geoambientes, que no contexto deste trabalho, é definido como ambiente geográfico que em uma dada extensão territorial, apresenta homogeneidade com relação a determinados fatores ambientais de interesse, ou a maioria deles (DIAS *et al.*, 2002). Os fatores ambientais em questão dizem respeito às características das rochas, dos solos, do relevo e da vegetação.

Os solos são o elo entre os mundos biótico e abiótico (SANTUCCI, 2005), e de acordo com Troppmair (2004), os grandes domínios vegetais são determinados pela ação climática, enquanto diferenças em nível local estão diretamente ligadas às variações do solo e relevo. É reconhecido que os solos e a geomorfologia exercem um papel chave na estruturação das comunidades vegetais presentes nos Complexos Rupestres brasileiros (SCHAEFER *et al.*, 2016a).

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo identificar, caracterizar e mapear as unidades geoambientais presentes no PARNA-SG, caracterizando os solos presentes em cada geoambiente, observando os aspectos físicos, químicos e morfológicos. Buscou-se aprofundar o conhecimento pedológico, na procura do entendimento sobre a influência dos fatores edáficos na distribuição e diversidade geoambiental do PARNA-SG.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da Área de Estudo

Localizado na Serra do Espinhaço e inserida mais especificamente no QF, o PARNA-SG tem uma área de 312,7 km², que é compartilhada entre os municípios de Rio Acima, Nova Lima, Itabirito, Raposos, Caeté, Mariana, Ouro Preto e Santa Bárbara (Figura 1) Para fins práticos, este trabalho utilizou as informações sobre o meio físico levantadas pelo Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico (2005), elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), que contempla 276,49 Km², equivale a 88,18% da área total do parque.

Na SG ocorrem os divisores entre as bacias do Rio das Velhas (São Francisco) e Bacia do Rio Piracicaba (Rio Doce), importantes na captação de grande parte da água que abastece a Região Metropolitana de Belo Horizonte (ANA, 2010). O clima da região é o Cwa de acordo com classificação de Köppen, possuindo duas estações climáticas bem definidas: verão ameno e úmido e inverno frio e seco, com temperatura média anual de 20° C e a precipitação média de até 2.000 mm dependendo do setor.

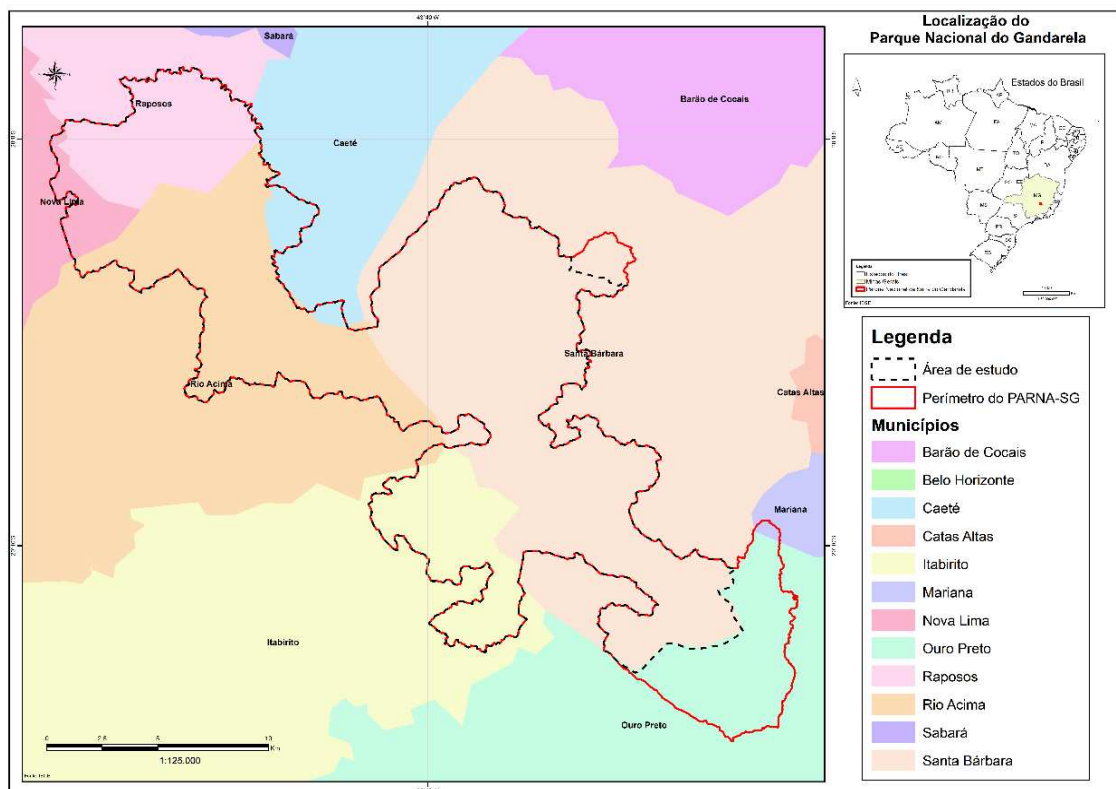


Figura 2 - Mapa de Localização do Parque Nacional da Serra do Gandarela (dados baseados no IBGE).

O PARNA-SG está inserido em uma região de geologia diversa e complexa dentro do QF, e que de forma resumida é formada, desde sua base, pelo embasamento cristalino (granitos, gnaisses e migmatitos); sobreposto pelo Supergrupo Rio das Velhas (basicamente quartzitos, xistos e filitos), pelo Supergrupo Minas, (quartzitos, xistos, filitos e formações ferríferas) e finalmente pelo Grupo Itacolomi (basicamente quartzitos) (ALKMIM & MARSHAK, 1998; SILVA & SALGADO, 2009).

De acordo com Varajão (1991) e Salgado *et al.* (2010), existe uma denudação geoquímica diferencial na região, onde os quartzitos e Itabiritos são as rochas de maior resistência compondo os topos de serra; os xistos, filitos e granito-gnaisses, têm resistência mediana formando patamares menos elevados e encostas; e por último mármore e dolomitos que apresentam a menor resistência, e compõem paisagens mais rebaixadas.

O PARNA-SG abrange uma região ecotonal onde os biomas Mata Atlântica e Cerrado coexistem e se sobrepõem em áreas transicionais, formando um mosaico de formações florestais, savânicas e campestres. Graças ao relevo movimentado e o alto índice de erosão da área, são comuns afloramentos rochosos onde predominam campos rupestres. Essa região é constituída por paisagens antigas de solos inférteis sob longo período de estabilidade climática (OCBIL) (HOPPER, 2009), sendo essas características a base de uma hipótese geral para explicar sua riqueza e endemismo. Esses ecossistemas de topo de montanha extremamente antigos representam um museu de linhagens ancestrais e um berço de contínua diversificação de linhagens endêmicas (SILVEIRA *et al.* 2016).

2.2. Individualização e Quantificação dos Geoambientes do Parque Nacional da Serra do Gandarela

Após análise prévia de mapas geológicos locais, a geologia foi compilada e agrupada para fins de simplificação, utilizando mapas geológicos dos estudos realizados pela CPRM através do Projeto APA Sul RMBH (2005) e visitas sistematizadas a campo cobrindo toda a área de estudo. Com base na natureza do substrato geológico foi possível a separação hierárquica mais elevada das áreas ocupadas pelos principais geossistemas presentes dentro dos limites do parque (tabela 1).

Tabela 1 – Geossistemas do PARNA-SG e seus respectivos litotipos principais.

Geossistema	Litotipos Principais
Ferruginoso	Itabirito, Itabirito Dolomítico, Dolomito, Areia e sedimento elúvio-coluvionar (canga), Metatufo, Quartzito e Filito Ferruginosos, Filito, Mármore, Metagabro, Xisto, Metaconglomerado,
Metapelítico	Xisto, Filito, Metagrauvaca, Quartzito e Filito Ferruginosos, Quartzito, Metarenito, Metapelito, Metaconglomerado, Metatufo
Quartzítico	Quartzito, Metaconglomerado, Quartzito e Filito Ferruginosos, Xisto, Metagrauvaca, Metagabro, Serpentinó, Filito, Metarenito, Metapelito

Para a delimitação dos geoambientes em nível hierárquico inferior aos geossistemas, foi realizada a estratificação do meio físico em função combinada com atributos das litologias, relevo, dos tipos de vegetação, e dos solos nos compartimentos da paisagem, seguindo o método ecogeográfico de Tricart & Kiewiet de Jonge, (1992); modificado por Schaefer *et al.* (2000) e aplicado em diversos estudos em unidades de conservação no Brasil (SCHAEFER *et al.* 2020, MENDONÇA *et al.* 2013, BRANDAO *et al.* 2010) A abordagem geoambiental adotada permitiu identificar e mapear geoambientes que possuem padrões característicos distintos. Os limites baseados nas características dos geoambientes foram reavaliados em uma etapa posterior de verificação em campo.

A digitalização do mapa de Geoambientes foi realizada através do programa ArcGis 10.2® da ESRI, utilizando como base imagens de alta resolução do satélite disponibilizadas pelo Basemap – World Imagery (Maxar). O mapa foi projetado no sistema UTM e datum SIRGAS 2000, na escala 1: 10.000. Os padrões identificados em tela foram aferidos através de avaliações diretas na área. Para isso, diversos pontos aleatoriamente alocados ao longo das unidades de mapeamento foram verificados em campo, com o apoio de um GPS, com as bases do projeto e a poligonal da área de estudo.

2.3. Levantamento, Caracterização e Classificação dos Solos

Em todos os geoambientes em análise foi realizado o levantamento dos solos, com a finalidade de verificar as variações pedológicas presentes entre os ambientes. Pelo menos um perfil de solo foi aberto por geoambiente, seguindo os procedimentos do Manual de Descrição

e Coleta de Solos no Campo (SANTOS *et al.* 2013), acompanhado da caracterização morfológica e coleta de solo para análises químicas e físicas de cada horizonte, descrito no Manual de Análise de Solos (EMBRAPA, 2017). Os solos foram classificados até o quarto nível categórico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018).

Para compreender o papel dos atributos químicos e físicos do solo nas relações entre os geoambientes e as variações pedológicas presentes entre os geoambientes e seus respectivos geossistemas, foram coletadas cinco (5) amostras superficiais simples de solos de 0-20 cm de profundidade, em cada geoambiente.

Todas as amostras foram submetidas às análises químicas e físicas, descritas segundo Embrapa, (2017). As variáveis de solos determinadas foram: acidez ativa (pH em água); teores disponíveis de P, K, Ca, Mg, Zn, Fe, Mn e Cu; acidez trocável (Al^{3+}) e potencial (H+Al); soma de bases (SB) e saturação por bases (V); capacidade de troca catiônica potencial (T) e efetiva (t); saturação por alumínio (m), além dos teores de matéria orgânica (MO) e fósforo remanescente (P-rem).

2.4. Análises Estatísticas

As variáveis físicas e químicas obtidas das amostras superficiais foram utilizadas em uma Análise de Componentes Principais (PCA), a fim de obter detalhes sobre as características do solo em relação às unidades geoambientais e geossistemas. A PCA foi processada no programa R Core Team (2015).

Para analisar as principais diferenças significativa entre os atributos físicos e químicos do solo dos geoambientes e geossistemas foi realizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Com os resultados obtidos foram montados gráficos Box-Plot para facilitar a análise e o entendimento dos resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia na escala adotada neste trabalho (1: 10.000) permitiu a separação de 16 geoambientes distintos, distribuídos dentro dos três geossistemas identificados. O mapeamento registrou também as áreas antrópicas (propriedades rurais, plantios de eucalipto

e mineração) dentro do PARNA-SG. Na tabela 2 estão apresentados os geoambientes e suas respectivas áreas, enquanto a tabela 3 mostra as áreas dos geoambientes em relação aos seus biomas, geossistemas e formações vegetais. A figura 3 mostra o mapa dos geoambientes do PARNA-SG e seus solos associados.

O mapeamento indicou Capão Alto quartzítico sobre Latossolos/Cambissolos como o geoambiente com a maior área dentro do PARNA-SG, com 5041 ha (18,23%) da área total estudada. Em seguida outro geoambiente florestado, de Capão Alto ferruginoso sobre Latossolos/Plintossolos, somou 13,86 % da área. Sozinhos estes dois ambientes florestados ocuparam 32,09% da área em estudo, o equivalente a 8874 ha. Florestas altimontanas em substratos ferruginosos e quartzíticos são raras em todo o QF, e esses quantitativos servem para revelar a enorme importância da SG na conservação de remanescentes florestais com alto endemismo. Dois geoambientes de formações savânicas se destacam entre os de maior área dentro do parque, Cerrado *stricto sensu* quartzítico sobre Cambissolos, com 3176 ha (11,49%) e Cerrado Rupestre quartzítico sobre Neossolos com 1602 ha (5,79%), totalizando juntos 4778 ha (17,28%). No primeiro caso, os quartzitos não são tão puros como os encontrados nos Campos rupestres quartzíticos, característica que faz com que essas rochas mais ricas em micas sejam menos resistentes ao intemperismo, e por isso estão em topografia relativamente rebaixada, sob cobertura savânica, essas características revelam uma diversidade dos litotipos deste geossistema. Estes 4 geoambientes acima citados ocupam praticamente 50% da área de estudo. Os Campos Rupestres Quartzíticos ocuparam uma área total de 1528 ha (5,53%), enquanto os Campos Rupestres Ferruginosos cobriram 1655 ha (5,99%). São geoambientes emblemáticos na conservação de Campos Rupestres em Minas Gerais e no Brasil, e igualmente corroboram com o valor estratégico da SG na conservação da geobiodiversidade. É importante notar que a área de estudo, possui 11,52% do total de Campos Rupestres, representando aproximadamente o dobro que foi quantificado para o QF, de 5,4% (FERNANDES *et al.*, 2021).

O geossistema quartzítico, com a maior expressão quantitativa (55,21% da área de estudo), abrangeu todas as categorias de geoambientes estudados, sendo o geoambiente Cerrado Rupestre quartzítico sobre Neossolos, exclusivo deste geossistema. As áreas de plantio de eucalipto e as áreas antropizadas somaram 1272 ha (4,60%).

Tabela 2 – Geoambientes do PARNA-SG e suas respectivas áreas:

Geoambiente	Área (ha)	Área (%)
Capão Alto quartzítico sobre Latossolos/Cambissolos	5041	18,23
Capão Alto ferruginoso sobre Latossolos/Plintossolos	3833	13,86
Cerrado stricto sensu quartzítico sobre Cambissolos	3176	11,49
Capão Baixo metapelítico sobre Cambissolos	1629	5,89
Cerrado Rupestre quartzítico sobre Neossolos	1602	5,79
Campo Sujo quartzítico sobre Neossolos/Cambissolos	1491	5,39
Capão Baixo quartzítico sobre Cambissolos	1332	4,82
Campo Rupestre aberto quartzítico sobre Neossolos	1205	4,36
Capão Baixo ferruginoso sobre Plintossolos/Cambissolos	1205	4,36
Campo Limpo quartzítico sobre Neossolos/Cambissolos	1095	3,96
Cerrado stricto sensu metapelítico sobre Cambissolos	948	3,43
Campo Rupestre arbustivo ferruginoso sobre Plintossolos/Cambissolos	853	3,09
Campo Rupestre aberto ferruginoso sobre Plintossolos/Neossolos	802	2,90
Capão Alto metapelítico sobre Latossolos/Cambissolos	741	2,68
Campo Limpo metapelítico sobre Neossolos /Cambissolos	653	2,36
Campo Sujo metapelítico sobre Neossolos/Cambissolos	448	1,62
Área antropizada	1272	4,60
Campo Rupestre arbustivo quartzítico sobre Neossolos/Cambissolos	323	1,17
Total	27649	100

Tabela 3 – áreas dos geoambientes em relação aos biomas, geossistemas e formações vegetais do PARNA-SG.

Aspectos Geoambientais	Área (ha)	Área (%)
Bioma		
Mata Atlântica	13781	49,84
Cerrado	9413	34,04
Campo Rupestre*	3183	11,51
Geossistema		
Quartzítico	15265	55,21
Ferruginoso	6693	24,21
Metapelítico	4419	15,98
Formações		
Florestal	13781	49,84
Campestre	6870	24,85
Savânico	5726	20,71

* Campos rupestres não representam biomas *sensu strictu* pelo ordenamento usado pelo IBAMA, e ocorrem associados a diferentes biomas no Brasil.

Com 13781 ha (49,84%) o bioma Mata Atlântica contribui com a maior área ocupada pelos geoambientes dentro do PARNA-SG. Os geoambientes pertencentes as formações do bioma Cerrado contribuíram com 9413 ha (34,4%). É possível observar no mapa o aumento da expressão savânica no setor noroeste do PARNA-SG (figura 2) principalmente nos patamares internos e encostas sobre filitos e xistos, e xisto quartzosos muito intemperizados, demonstrando a existência de um gradiente climático Leste-Oeste, com progressivo aumento das formações florestais para leste, na direção do Bioma Mata Atlântica, e o oposto para oeste. Tal fato ilustra a natureza ecotonal da SG, formando um mosaico complexo de geoambientes.

Nos afloramentos rochosos entre formações do Cerrado e Mata Atlântica ocorrem os campos rupestres abertos e arbustivos, ambientes exclusivos dos geossistemas Ferruginoso e Quartzítico. Ocorrem em proporções semelhantes dentro do PARNA-SG, cobrindo 3183 ha (11,51%), estes geoambientes dominam as áreas mais elevadas do PARNA-SG, onde estão associados as rochas e produtos de intemperismo com maior resistência à erosão como quartzitos, itabiritos e cangas.

Devido à sua limitada ocorrência em território nacional, os campos rupestres ferruginosos podem ser considerados os ambientes mais ameaçados dentro do PARNA-SG, enquanto os campos rupestres quartzíticos, são mais amplamente distribuídos na Serra do Espinhaço, e resguardados em unidades de conservação de tamanhos consideráveis, como o Parque Nacional da Serra do Cipó, e o Parque Nacional das Sempre-vivas. A situação dos campos rupestres ferruginosos no Espinhaço requer atenção imediata (JACOBI & CARMO, 2008), e a SG com uma extensa área remanescente preservada, representa área-chave para sua conservação.

A grande diversidade geoambiental observada num mosaico altimontano que intercala florestas, campos e savanas, é sustentada por solos singulares, com características inerentes à natureza geológica dos geossistemas, relevo e processos ecológicos a que estão submetidos nos diferentes compartimentos da paisagem local.

VARAJÃO *et al.* (2009) em seu trabalho que buscou mensurar as taxas de erosão e pedogênese no QF, mostraram que a existência de solos pouco desenvolvidos, com horizonte B incipiente ou ausente, em determinados substratos geológicos, guardam relação estreita com material de origem resistente. Já a ocorrência simultânea de solos bem desenvolvidos, com horizonte B latossólico, geneticamente originados de materiais coluvionares oriundos destas mesmas litologias a montante destas áreas, estabelece uma importante relação com os processos

erosivos nas encostas, e maior estabilidade da paisagem ao intemperismo. O domínio de solos pouco evoluídos com forte influência do material de origem em suas características, aponta para uma preponderância geral dos processos erosivos, sobre os pedogenéticos, condicionada pelo relevo movimentado, pela resistência ao intemperismo das rochas e pelo baixo recobrimento da vegetação nas áreas campestres e nos afloramentos rochosos (CARVALHO FILHO *et al.* 2010). Com a maior proximidade das rochas e da superfície, os aspectos químicos e físicos dos solos analisados em cada geoambiente, mostraram diferenças significativas importantes entre os mesmos, e apontam para a importância do solo e seu papel no estabelecimento das fitofisionomias em cada geoambiente do PARNA-SG.

A Tabela 4 abaixo apresenta os principais e mais representativos solos encontrados nos geossistemas e seus respectivos horizontes A e horizontes diagnóstico. As análises estáticas foram realizadas com o resultado das análises físicas e químicas das amostras superficiais de cada geoambiente, e estão representadas nos diagramas das PCAs e nos gráficos Box-plot das figuras abaixo.

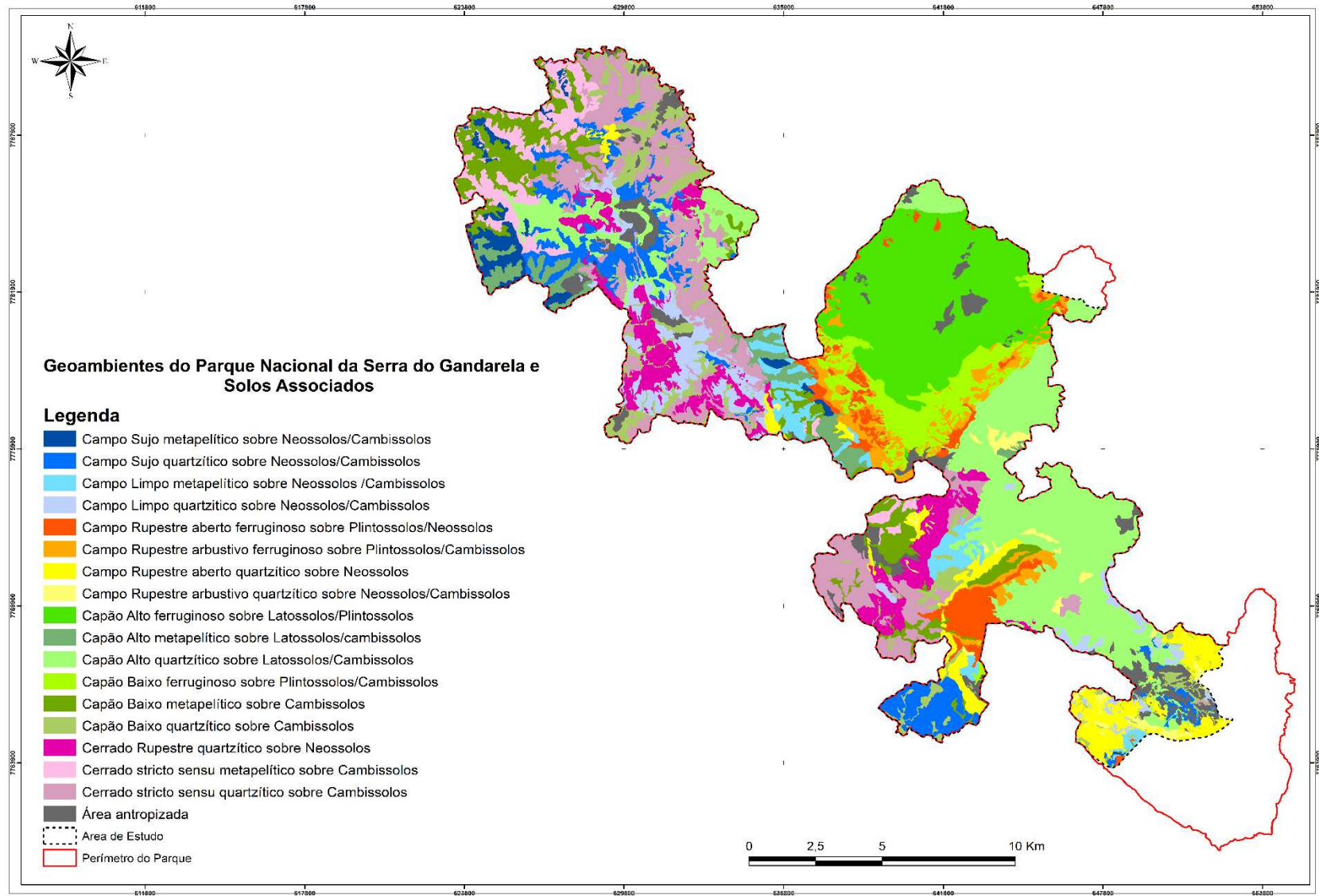


Figura 3. Mapa dos Geoambientes do Parque Nacional da Serra do Gandarela e seus solos associados

Tabela 4 –Atributos físicos e químicos dos solos representativos dos geossistemas do PARNA-SG e seus respectivos horizontes A e horizontes diagnóstico.

Horizonte	Profundidade (cm)	pH				Complexo Sortivo											P	V	m	M.O. ¹			
		< 2 mm				H ₂ O	KCl	ΔpH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	T					cmol _c dm ⁻³	mg dm ⁻³	%
		Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	dag/kg																	
P1 - Plintossolo Pétrico Litoplíntico Típico - Campo Rupestre Aberto Ferruginoso - 1612 m																							
Ac	0-8	54,9	3,3	15,8	26,1	3,94	3,01	-0,93	1,65	0,35	0,19	0,14	1,66	23,30	2,33	25,63	2,80	9,10	41,60	13,63			
Fm	8-20	62,4	3,1	14,6	19,9	4,27	3,11	-1,16	1,18	0,32	0,23	0,19	1,66	19,40	1,92	21,32	2,80	9,00	46,40	10,64			
P2 - Plintossolo Pétrico Concrecionário Húmico - Campo Rupestre Arbustivo Ferruginoso - 1619 m																							
A	0-60	34,9	7,1	11,9	46,1	4,92	4,02	-0,90	1,77	0,60	0,13	0,03	0,65	14,00	2,54	16,54	0,80	15,40	20,40	11,31			
Bic	6-35	30,9	7,5	13,9	47,7	5,20	4,19	-1,01	0,20	0,10	0,06	0,05	0,55	12,50	0,41	12,91	0,00	3,20	57,30	6,12			
P3 - Latossolo Vermelho Concrecionário Húmico - Capão Alto Ferruginoso - 1636 m																							
Ah	0-38	32,9	5,6	19,9	41,5	5,68	4,69	-0,99	3,69	2,35	0,11	0,08	0,10	14,20	6,23	20,43	3,40	30,50	1,60	12,38			
BW	38-90	26,6	3,6	15,3	54,6	5,43	4,83	-0,60	0,18	0,23	0,00	0,03	0,00	6,80	0,44	7,24	0,70	6,10	0,00	3,16			
P4 - Organossolo Háptico Sáprico Típico - Capão Alto Quartzítico - 1370 m																							
O1	0-26	21	7,4	28,7	43,0	4,50	3,91	-0,59	0,09	0,11	0,16	0,00	5,14	30,60	0,36	30,96	6,70	1,20	93,50	38,29			
O2	26-50	10,9	6,2	15,7	67,2	4,49	4,15	-0,34	0,10	0,01	0,02	0,00	2,38	21,20	0,13	21,33	1,30	0,60	94,80	18,20			
O3	50-100+	28,3	8,7	19,1	43,8	4,55	4,16	-0,39	0,12	0,03	0,02	0,00	2,76	29,50	0,17	29,67	2,30	0,60	94,20	27,62			
P5 - Cambissolo Háptico Tb Distrófico Típico - Cerrado <i>Strictu Sensu</i> Quartzítico - 1290 m																							
A	0-15	34,2	28,1	17,1	20,6	4,39	3,89	-0,50	0,11	0,05	0,08	0,00	1,81	10,20	0,24	10,44	1,50	2,30	88,30	5,15			
Bi	50-80	31,8	27,3	17,9	23,1	4,74	4,16	-0,58	0,07	0,01	0,02	0,00	0,95	6,90	0,10	7,00	0,60	1,40	90,50	2,89			
P6 - Neossolo Regolítico Distrófico Típico - Campo Limpo Metapelítico - 1220 m																							
A	0-6	18,3	21,7	41,1	18,9	4,90	3,99	-0,91	0,31	0,05	0,06	0,00	1,05	4,20	0,42	4,62	1,50	9,10	71,40	3,77			
Cr	6-35+	8	18,9	53,2	19,9	4,92	4,14	-0,78	0,12	0,01	0,02	0,00	0,67	2,80	0,15	2,95	1,10	5,10	81,70	2,26			
P7 - Cambissolo Háptico Tb Distrófico Típico - Capão Alto Metapelítico - 1160 m																							
A	0-25	12,7	13,4	31,5	42,4	5,02	4,17	-0,85	0,66	0,22	0,07	0,00	0,38	4,60	0,95	5,55	0,80	17,10	28,60	2,39			
Bi	45-65	11,7	11,7	32,6	44,0	4,85	4,27	-0,58	0,23	0,03	0,01	0,00	0,48	3,00	0,27	3,27	0,60	8,30	64,00	0,88			
P8 - Neossolo Litólico Húmico Típico - Campo Rupestre Arbustivo Quartzítico - 1346 m																							
A	0-15/25	57,1	21,9	9,7	11,3	4,21	3,08	-1,13	0,44	0,06	0,05	0,00	2,29	11,90	0,55	12,45	3,20	4,40	80,60	7,22			
CR	25-40	67,5	17,8	6,8	8,0	4,35	3,28	-1,07	0,27	0,02	0,03	0,00	1,71	8,30	0,32	8,62	3,70	3,70	84,20	3,01			
P9 - Neossolo Regolítico Distrófico Típico - Campo Rupestre Aberto Quartzítico - 1500 m																							
A	0-5	18,2	41,5	27	13,3	4,77	4,08	-0,69	0,27	0,04	0,05	0,00	0,57	3,60	0,36	3,96	1,40	9,10	61,30	2,13			
Cr	5-20	16,5	31,4	34,3	17,8	4,69	4,16	-0,53	0,19	0,02	0,05	0,00	0,67	3,60	0,26	3,86	1,30	6,70	72,00	2,26			

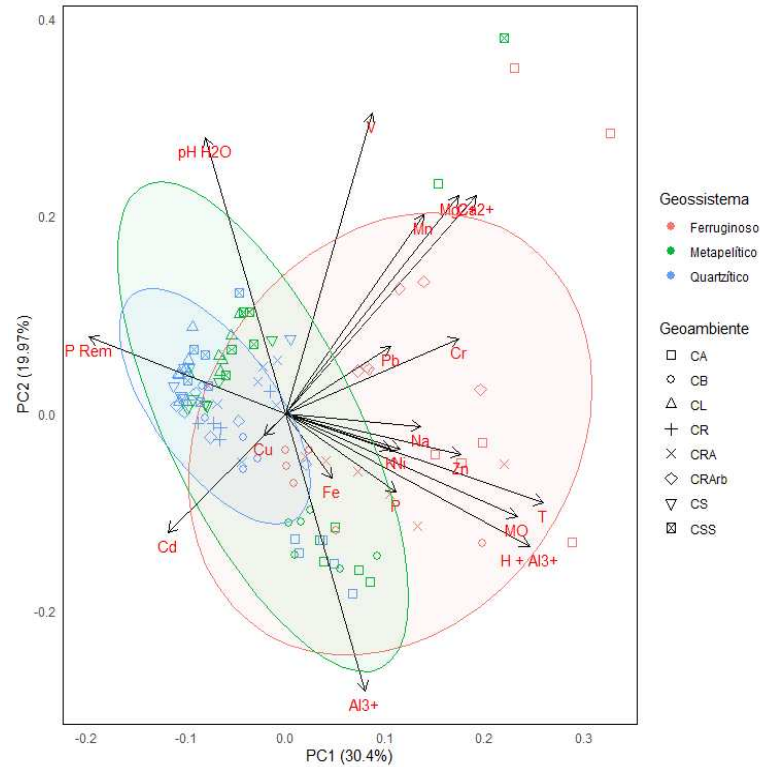


Figura 4 – PCA dos atributos químicos dos solos do PARNA-SG. CA = Capão Alto, CB = Capão Baixo, CL = Campo Limpo, CR = Cerrado Rupestre, CRA = Campo Rupestre Aberto, CRArb = Campo Rupestre Arbustivo, CS = Campo Sujo e CSS = Cerrado *Stricto Sensu*.

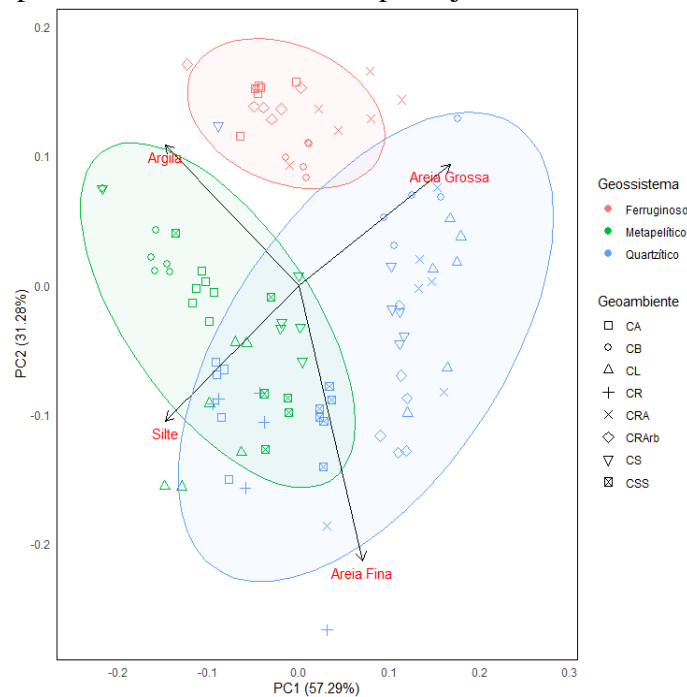


Figura 5 – PCA dos atributos físicos dos solos do PARNA-SG. CA = Capão Alto, CB = Capão Baixo, CL = Campo Limpo, CR = Cerrado Rupestre, CRA = Campo Rupestre Aberto, CRArb = Campo Rupestre Arbustivo, CS = Campo Sujo e CSS = Cerrado *Stricto Sensu*.

A PCA dos atributos químicos dos solos dos geoambientes em relação aos geossistemas do PRNA-SG (Figura 4) foi capaz de explicar 50,37% da variância dos dados, com 30,40 % para o PC1 e 19,97 % para o PC2.

Os geoambientes do geossistema ferruginoso foram agrupados com influência positiva dos vetores MO, T e H+Al, e de forma moderada pelos vetores Ca^{2+} e Mg^{2+} , e negativamente pelos vetores P-rem. O gráfico da figura 6-a referente aos teores de MO, mostra que existem diferenças significativas entre os solos de todos os geossistemas estudados, sendo o geossistema ferruginoso o que apresentou os teores mais elevados de MO, seguido pelos geossistemas metapelítico e quartzítico. Dentro do geossistema ferruginoso os solos apresentam teores mais elevados de MO nos ambientes campestres do que nos florestais, já em todos os demais geossistemas os maiores teores de MO são geralmente encontrados nos geossistemas florestais (figura 8-m), corroborando com Carvalho Filho *et al.* (2010) em levantamento para a mesma região. O gráfico da figura 6-b referente aos valores de CTC (T), mostra que o geossistema ferruginoso tem diferenças significativas em relação ao geossistema metapelítico, mas não tem em relação ao geossistema quartzítico. Apesar de todos os solos mostrarem baixos valores de CTC em todos os geossistemas, os valores relativamente mais elevados de CTC no geossistema ferruginoso têm relação com o maior acúmulo de MO nas partes mais altas e frias, aumentando a geração de cargas negativas (BAYER & MIELNICZUK, (1997), SCHAEFER *et al* (2016 b) e MARTINS *et al* (2018)), Revela-se assim a importância da MO acumulada nas partes mais altas da SG como fator chave na geração de cargas e CTC total, já que o oligotrofismo dos solos é generalizado, resultante da pobreza química do próprio material parental, das perdas intensas e prolongadas por lixiviação do sistema, dada às condições do relevo elevado, movimentado e a pouca espessura do *solum*, de forma geral (BENITES *et al.* 2003), além de constituir mantos de intemperismo muito antigos, com idades que remontam ao Cretáceo (Spier *et al.* 2006).

. Os teores de H+Al (figura 7-h) estão intimamente associados aos teores de MO, com diferenças significativas entre os geossistemas ferruginoso e metapelítico, sem diferença significativa entre os geossistemas ferruginoso e quartzítico. Os gráficos das figuras 6-c e 6-d mostram respectivamente o mesmo comportamento entre os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , havendo diferenças significativas entre os geossistemas ferruginoso e metapelítico e também entre os geossistemas metapelítico e quartzítico. Mesmo que em baixos níveis gerais, o geossistema ferruginoso apresentou os maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , corroborando com o agrupamento

destes geoambientes na PCA. Os níveis mais elevados destas bases podem estar relacionado a presença de rochas como os dolomitos do geossistema ferruginoso e rochas carbonáticas da Formação Gandarela, próximos a região de coleta das amostras de solo, esse material pode estar contribuindo, mesmo que de forma reduzida com a presença destes elementos no substrato ferruginoso, como mostrou Carvalho Filho et al. (2010) em seu levantamento na região.

Os geoambientes florestais CA e CB do geossistema metapelítico foram agrupados com influência positiva pelo vetor Al^{3+} e negativamente pelo vetor pH. Apesar de não haver diferença significativas entre os teores de Al^{3+} dos geossistemas (figura 6-e), quando analisamos os gráficos comparativo dos geoambientes (figura 8-r) notamos que CA e CB metapelíticos, apresentam os maiores teores de Al^{3+} entre os demais geoambientes, o que corrobora estudos prévios no QF (FARIA, 2012 e CARVALHO FILHO *et al.* 2010) que mostram elevados teores de Al^{3+} em solos oriundos de rochas metapelíticas. Os geoambientes das formações do Cerrado do geossistema metapelítico (CL, CS e CSS), ficaram agrupados principalmente pela influência positiva dos vetores P-rem e pH e de forma negativa influenciados pelos vetores T, MO e H+Al. Constata-se assim, que os solos sob as formações do Cerrado no PARNA-SG possuem menores teores de MO, por representarem climas mais secos e quentes nas cotas altimétricas mais baixas da SG. O gráfico da figura 6-f mostrou diferenças significativas para os valores de P-rem entre todos os geossistemas, e o gráfico comparativo dos geoambientes (Figura 9-w) mostra que os geoambientes das formações do Cerrado apresentam valores próximos de P-rem, esta afinidade poderia explicar esse agrupamento.

Os geoambientes do geossistema quartzítico ficaram agrupados positivamente principalmente pela influência do vetor P-rem, fracamente influenciados pelo vetor pH e negativamente influenciado pelos vetores T, MO, e H+Al. O gráfico da figura 6-f mostra que os solos do geossistema quartzítico tem os maiores valores de P-rem, além de ser significativamente diferente dos demais geossistemas, confirmando a relação positiva com o agrupamento destes geoambientes sob a influência do vetor P-rem. Isso ocorre, pois os solos desenvolvidos de substrato quartzítico, são muito arenosos e tem e a capacidade tampão reduzida em relação aos solos mais argilosos (principalmente óxidos com alta capacidade de adsorção de P) e com níveis mais elevados de MO. O geoambiente CA mostrou uma relação positiva com os teores de Al^{3+} ficando agrupado na mesma região das formações florestais metapelíticas. Na figura 8-r é possível notar que as formações florestais metapelíticas e o CA

quartzítico têm os teores mais elevados de Al^{3+} , corroborando com o agrupamento deste grupo de geoambientes. O Al^{3+} exerce um papel importante nestes geoambientes florestados, estabilizando a MO e assim retardando sua mineralização em ambiente ácido. (Volkoff et al., 1984; Benites et al., 2001; Simas, 2002, PILLON *et al.*, 2002). O pH não apresentou diferenças significativas entre os geossistemas (figura 7-g) e quando comparado entre os geoambientes (figura 9-x), nota-se que a variação é muito baixa, sendo todos os solos encontrados neste trabalho de caráter ácido.

A PCA dos atributos físicos dos solos dos geoambientes em relação aos geossistemas do PARNA-SG (Figura 5) foi capaz de explicar 88,57% da variância dos dados, com 57,29 % para o PC1 e 31,28 % para o PC2.

Os geoambientes do geossistema ferruginoso são influenciados positivamente em proporção similar pelos vetores Argila e Areia Grossa, e negativamente pelo vetor Areia Fina. Neste caso, os teores de Areia Grossa refletem o aporte de concreções lateríticas em tamanho areia, já que todos os solos do geossistema ferruginoso são concrecionários e cascalhentos, e boa parte dessas concreções degrada-se para frações menores, aumentando os teores de Areia Grossa. Corroborando este fato, o CRA ficou agrupado próximo ao vetor Areia Grossa enquanto os demais geoambientes ferruginosos tiveram um agrupamento direcionado pelo vetor Argila. A figura 7-i mostra que existem diferenças significativas entre os teores de Areia Grossa dos solos dos geossistemas ferruginoso e quartzítico, mas não há diferenças significativas quando comparado com o geossistema metapelítico. O gráfico da figura 10-y aponta que os teores de Areia Grossa do CRA são os mais elevados entre os geoambientes ferruginosos, com níveis parecidos aos dos CRA quartzítico, corroborando com o deslocamento deste geoambiente em direção ao vetor Areia Grossa. O gráfico da figura 7-k mostra que existem diferenças significativas entre os teores de Argila dos solos do geossistema ferruginoso e os demais geossistemas, na figura 10-a1 e possível notar que CRA ferruginoso apresenta os menores teores de Argila entre todos os geoambientes deste geossistema, indicando que os teores de argila tem um importante papel na retenção de água e no estabelecimento de plantas de maior porte (arbustivo e florestal) do que as encontradas nos CRA, aumentando a disponibilidade hídrica e de nutrientes no solo.

Os geoambientes do geossistema metapelítico foram influenciados positivamente principalmente pelos teores de Silte e secundariamente em direções opostas pelos teores de Argila e Areia Fina. Ocorreu uma divisão nos agrupamentos deste geossistema, onde os vetores

Site e Argila agruparam os geoambientes florestais CA e CB metapelíticos. O gráfico da figura 7-1 mostrou que existem diferenças significativas entre os teores de Silte dos solos dos geoambientes dos geossistemas metapelítico (onde o silte é herdado da rocha filítica) e quartzítico (onde há pouco silte no substrato arenoso), mas o mesmo não ocorre para os geossistemas metapelítico e ferruginoso. A figura 10-b1 aponta os geoambientes metapelíticos, onde os teores de Silte são mais elevados (herdados das rochas que deram origem a estes solos), quando comparados com os geoambientes da mesma fitofisionomia em geossistemas diferentes, exceto pelo CA metapelítico, que apresentou teores de Silte abaixo dos teores registrados para o CA quartzítico, que tem os teores mais elevados de silte dentro do grupo dos geoambientes florestados de maior porte. O gráfico da figura 10-a1 mostra que os geoambientes metapelíticos apresentam os teores mais elevados de argila quando comparados com geoambientes na mesma fitofisionomia em outros geossistemas, e que CA e CB metapelíticos, apresentam os maiores teores de Argila entre todos os geoambientes, corroborando com o agrupamento deste dois geoambientes sob a influência dos vetores Silte e Argila. Os demais geoambientes metapelíticos de formações do Cerrado, ficaram agrupados de forma positiva principalmente pelo vetor Silte e de forma moderada pelo vetor Areia Fina. Neste sentido, Coelho *et al.*, (2017), encontraram resultados convergentes para solos do QF sob formações florestais com elevados teores de silte e argila, enquanto os solos nas formações de Cerrado mostraram teores mais elevados de Silte e Areia Fina. Tem-se assim, uma ideia clara de que minerais micáceos de tamanho areia fina e silte, originalmente presentes nestes metassiltitos, intemperizam para formar a fração argila, mas ainda mantêm uma boa parte do silte como fração mineral herdada da rocha metapelítica. Trata-se de silte herdado aluminoso, como mostram estudos pedogenéticos sobre rochas metapelíticas de Minas Gerais (ALMEIDA, 1979).

De modo geral todos os ambientes metapelíticos foram influenciados negativamente pelo vetor Areia Grossa. É possível notar na figura 5 a existência de agrupamento entre parte dos geoambientes metapelíticos (CL, CS e CSS) e parte dos geoambientes quartzíticos (CA, CR, CSS) influenciados pelos vetores Silte e Areia Fina. O gráfico da figura 7-j mostrou que existem diferenças significativas entre os teores de Areia Fina de todos os solos dos geossistemas do PARNA-SG e o gráfico da figura 10-z mostra que os solos dos geoambientes do geossistema quartzítico tem os maiores teores de Areia Fina em relação aos demais geossistemas, seguido pelo geoambientes metapelíticos em todas as categorias de geoambientes afins.

Os geoambientes com formações campestres do geossistema quartzítico (CL, CS CRA e CRAR) ficaram agrupados principalmente pela influência positiva dos teores de Areia Grossa e Areia Fina, e negativamente pelo vetor Argila. O geoambiente CB quartzítico ficou agrupado sob a influência positiva do vetor Areia Grossa e negativamente pelo vetor Silte. O gráfico da figura 7-i mostra que há diferenças significativas entre os teores de Areia Grossa dos solos dos geoambientes do geossistema quartzítico comparados aos solos dos demais geossistemas. Os gráficos das figuras 10-y e 10-z mostram que CB quartzítico tem os maiores teores de Areia Grossa e os menores de Areia Fina respectivamente, quando comparados com os demais geoambientes quartzíticos, corroborando com o agrupamento deste geoambiente sob a influência do vetor Areia Grossa. CL quartzítico também apresentou teores elevados de Areia Grossa e ficou agrupado próximo ao CB quartzítico. As formações savânicas (CR e CSS) e o CA quartzíticos são positivamente associados aos teores de Silte e Areia Fina. Destaca-se a relação do CSS quartzítico com os teores de Areia Fina mostrado na PCA. O gráfico da figura 7-j mostra que há diferenças significativas entre os teores de Areia Fina nos solos de todos os geossistemas, enquanto os gráficos das figuras 10-z, 10-y e 10-b1 mostram que os maiores teores de Areia Fina em relação aos teores de Areia Grossa e Silte, pesaram no agrupamento do CSS quartzítico com o vetor Areia fina.

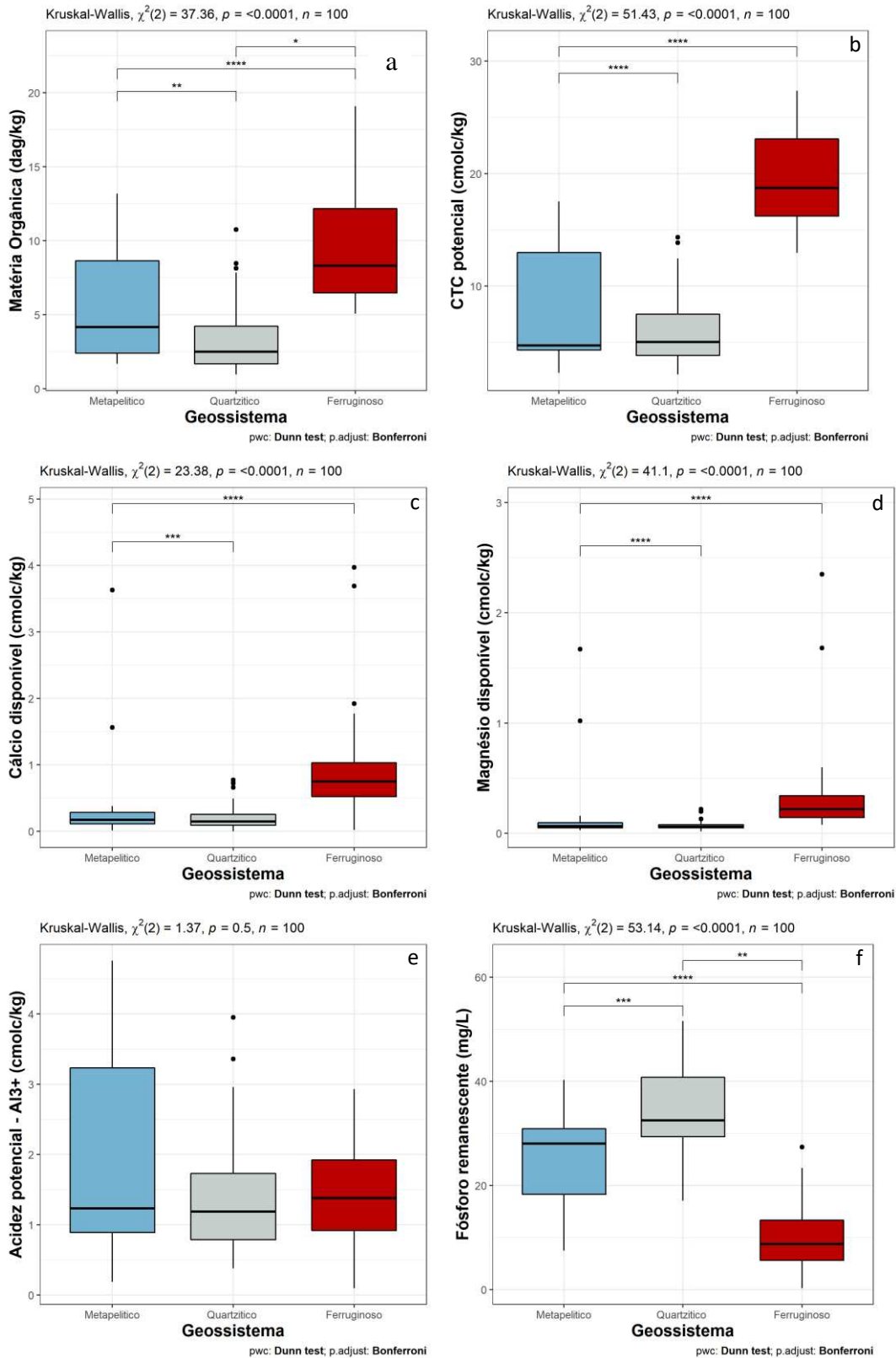


Figura 6 – Gráficos Box-plot dos atributos químicos dos solos do PARNA-SG.

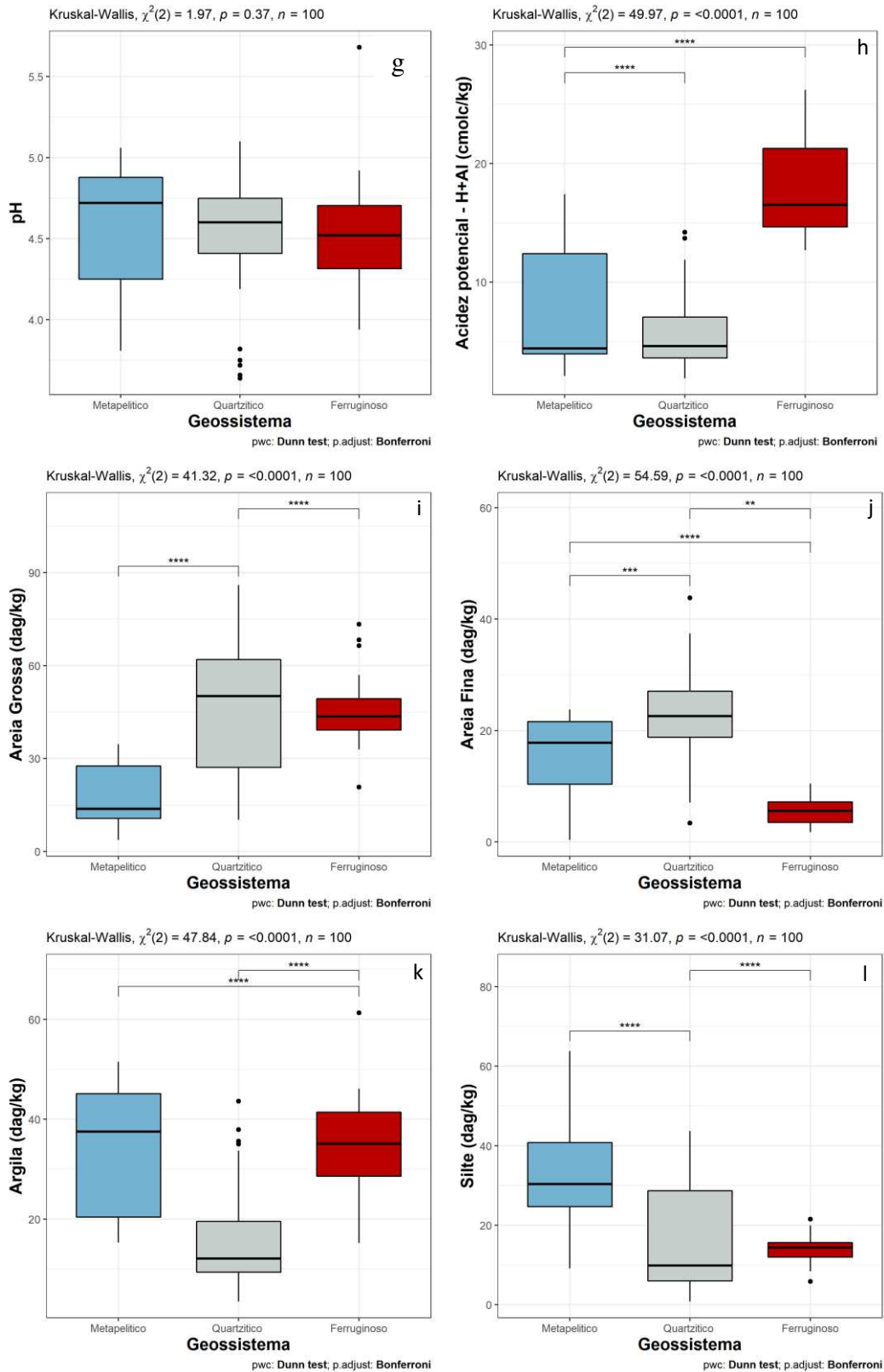


Figura 7 – Gráficos Box-plot dos atributos químicos e físicos dos solos do PARNA-SG.

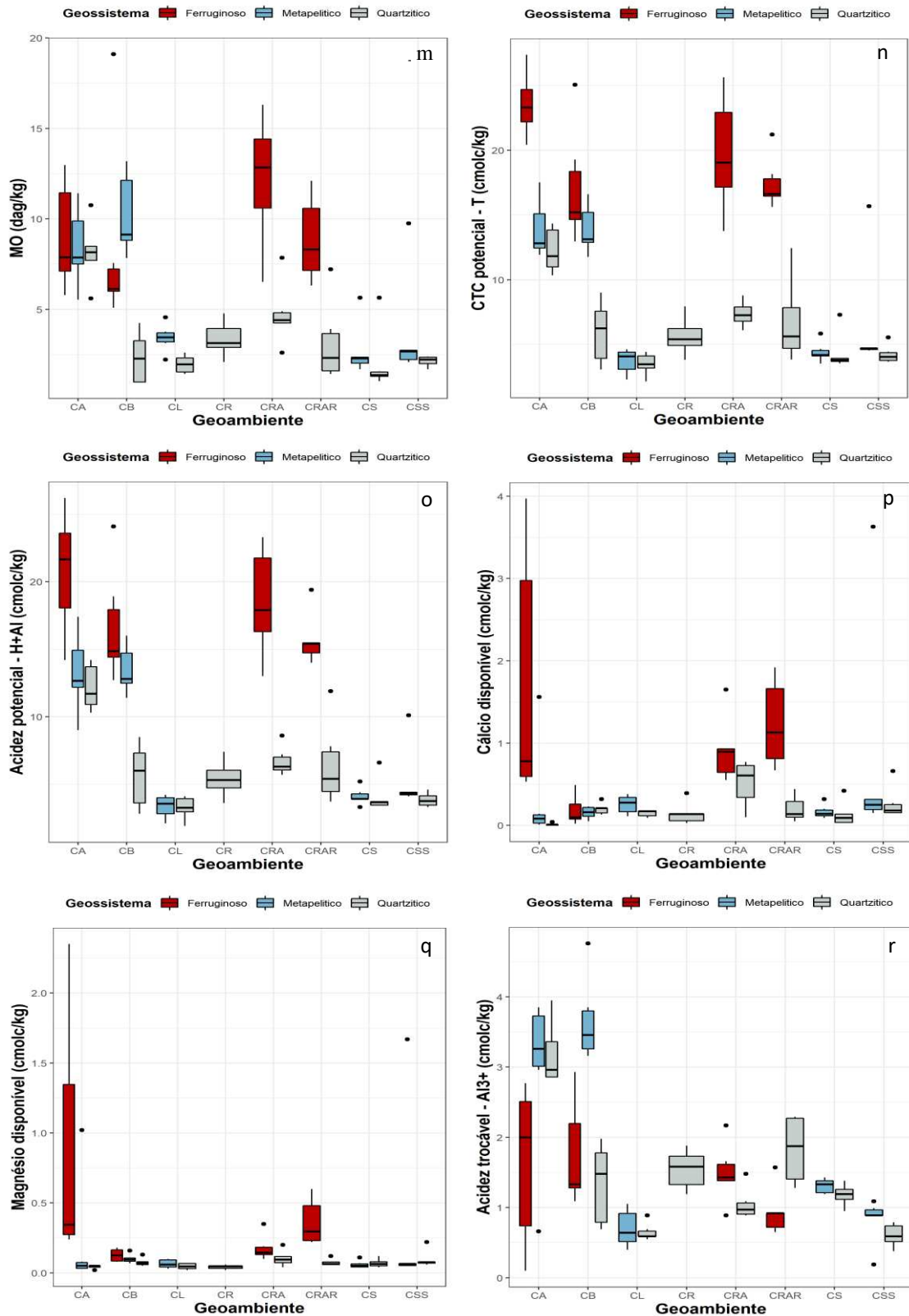


Figura 8 – Gráficos Box-plot dos atributos químicos dos solos do PARNA-SG. CA = Capão Alto, CB = Capão Baixo, CL = Campo Limpo, CR = Cerrado Rupestre, CRA = Campo Rupestre Aberto, CRAR = Campo Rupestre Arbustivo, CS = Campo Sujo e CSS = Cerrado *Stricto Sensu*.

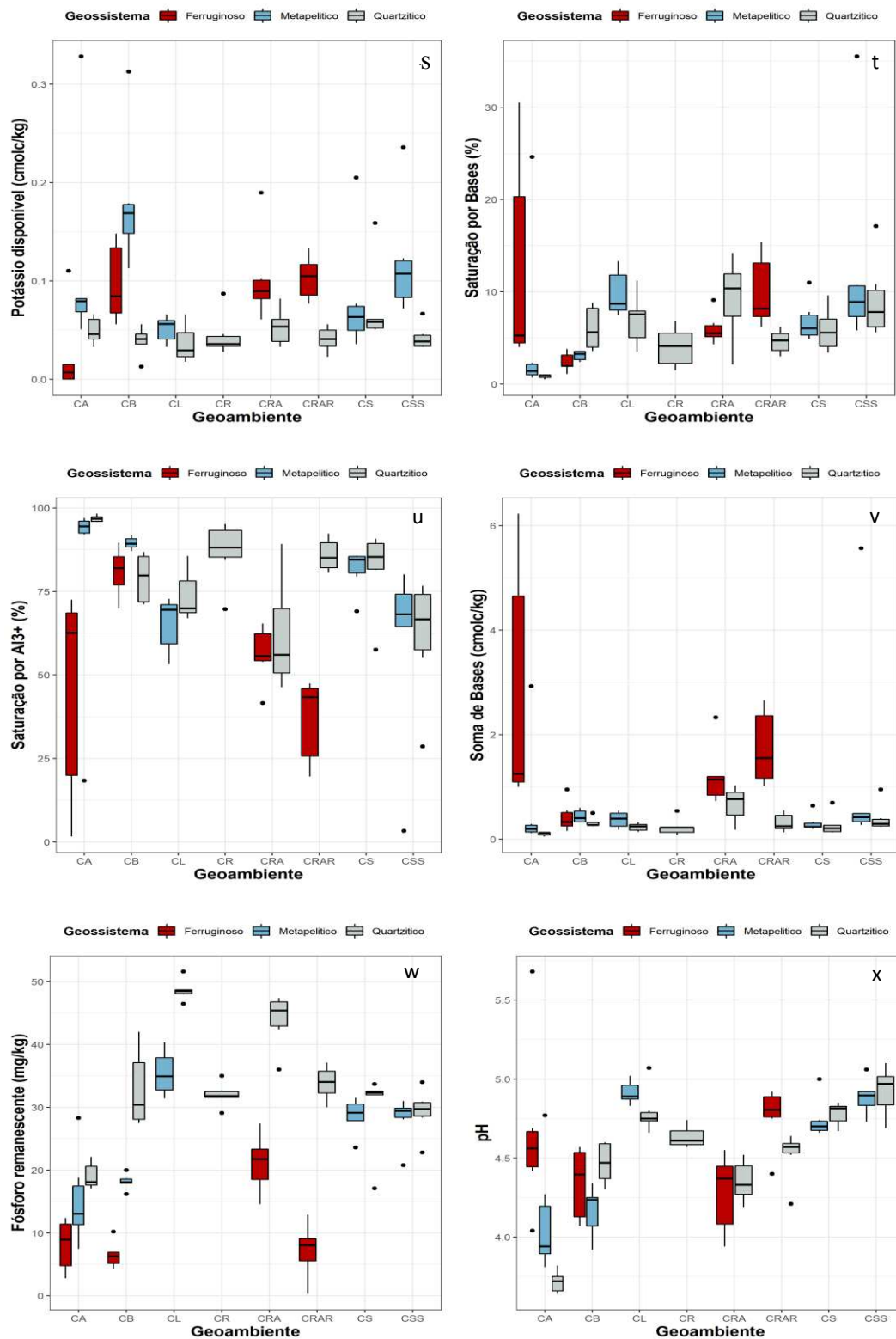


Figura 9 – Gráficos Box-plot dos atributos químicos dos solos do PARNA-SG. CA = Capão Alto, CB = Capão Baixo, CL = Campo Limpo, CR = Cerrado Rupestre, CRA = Campo Rupestre Aberto, CRAR = Campo Rupestre Arbustivo, CS = Campo Sujo e CSS = Cerrado *Stricto Sensu*.

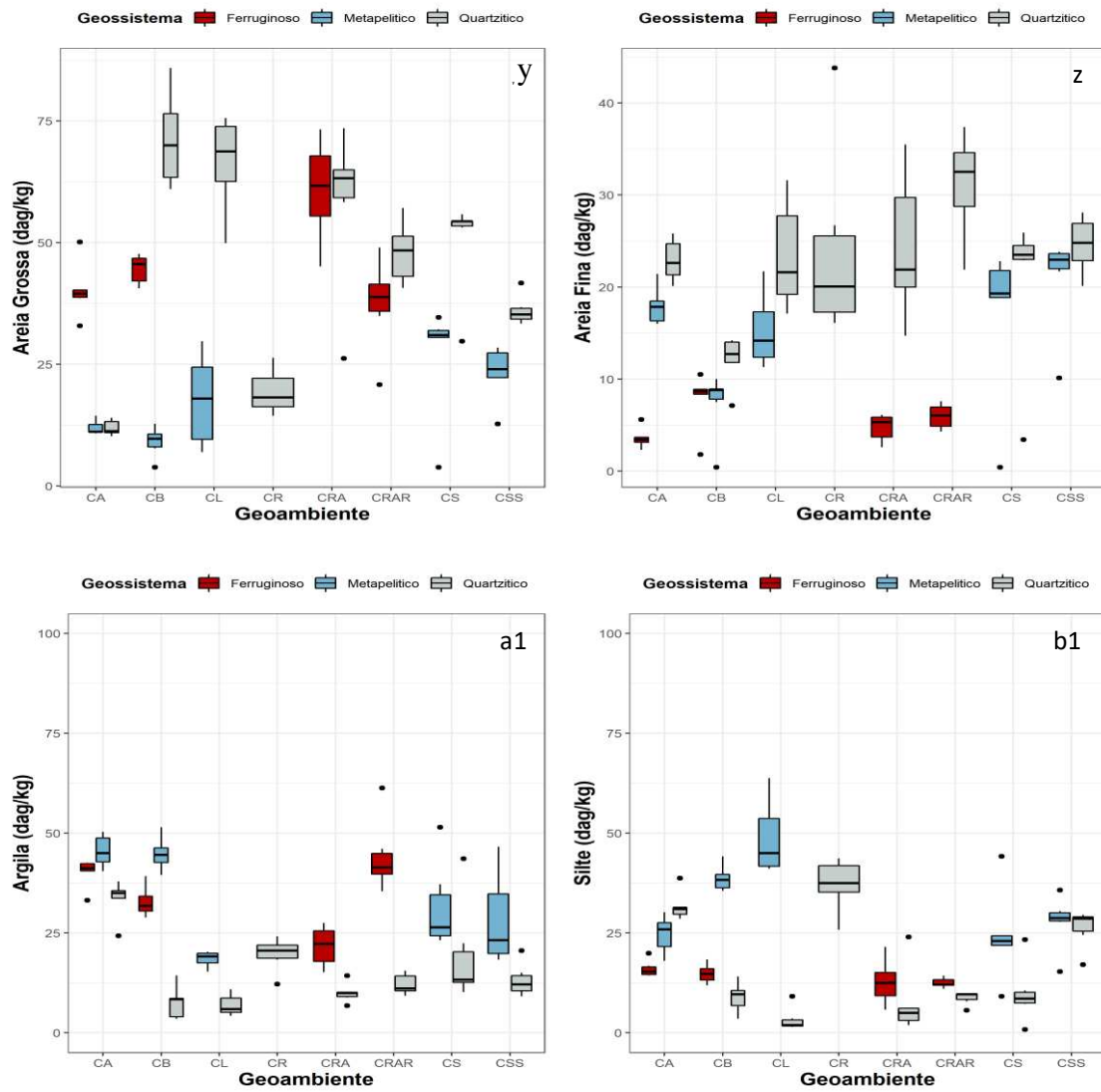


Figura 10 – Gráficos Box-plot dos atributos físicos dos solos do PARNA-SG. CA = Capão Alto, CB = Capão Baixo, CL = Campo Limpo, CR = Cerrado Rupestre, CRA = Campo Rupestre Aberto, CRAR = Campo Rupestre Arbustivo, CS = Campo Sujo e CSS = Cerrado *Stricto Sensu*.

4. CONCLUSÕES

Análise geoambiental realizada na escala de 1: 10.000 no PARNA-SG revelou elevada diversidade geoambiental, com grande representatividade de geoambientes florestados no setor centro-sudeste, sob influência do bioma Mata Atlântica, cobrindo 49,84% de cobertura da área estudada. O estudo também revelou indícios de um gradiente climático Leste-Oeste, com progressivo aumento de formações florestais para leste, e aumento da expressão savânica e campestre (relacionados ao bioma Cerrado) no sentido noroeste, associados aos patamares e encostas sobre filitos e xistos, e xisto quartzosos, todos muito intemperizados.

Os Campos Rupestres abertos e arbustivos, abrangendo tanto o geossistema ferruginoso quanto o quartzítico, ocupam 11,51% da área estudada no PARNA-SG o dobro do que ocorre no Quadrilátero Ferrífero como um todo. Estes geoambientes rupestres preenchem os critérios clássicos para o enquadramento como OCBIL. Como tal, demandam atenção especial nas estratégias de conservação dos recursos bióticos e abióticos que os compõem, principalmente nos geoambientes desenvolvidos sobre substrato ferruginoso.

O geossistema ferruginoso tem uma representatividade expressiva no PARNA-SG (24,21% da área estudada), e possuem alta relevância para conservação, tendo em vista que formações ferríferas ocorrem de forma muito restrita em todo território nacional, e o avanço da exploração minerária torna as unidades de conservação o único resguardo concreto para a preservação da diversidade nesses geoambientes. As variáveis MO, T, H+Al, Areia Grossa e Argila foram as mais relevantes para o geossistema ferruginoso.

O geossistema quartzítico, ocupa 55,21% da área de estudo e abrangeu todas as categorias de geoambientes estudados. Os solos analisados em cada geoambiente mostraram diferenças significativas nos atributos químicos e físicos entre os mesmos, e dentre os geossistemas do PARNA-SG. Para os geoambientes florestados do geossistema metapelítico, as variáveis mais significativas foram Al^{3+} , Silte e Argila. Já para os geoambientes das formações do Cerrado do geossistema metapelítico, as variáveis mais relevantes foram P-rem, pH, Silte e Areia Fina. Para os geoambientes do geossistema quartzítico as variáveis mais relevantes foram P-rem e pH. O geoambiente CA quartzítico assim como as formações florestais metapelíticas tiveram como principal variável o Al^{3+} . As variáveis físicas Areia Grossa e Areia Fina foram as mais importantes para os geoambientes com formações campestres do geossistema quartzítico, enquanto para o CB quartzítico Areia Grossa foi a variável mais preponderante.

É relevante destacar o contínuo ecossistêmico entre todos os geoambientes do Geossistema Ferruginoso, desde as Florestas até os Campos Rupestres. Portanto, no processo de compensação minerária, todos devem ser considerados igualmente relevantes na avaliação de equivalência, comparando-se cada geoambiente com o de igual relevância.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Atlas Brasil. Abastecimento Urbano de Água. Brasília/DF: MMA/ANA, 2010.

ALKMIM, F.F., MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29-58, (1998).

ALMEIDA, J.R. Cronocromossequência de solos originários de rochas pelíticas do Grupo Bambuí. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1979. 150p. (Tese de Mestrado).

BAYER, C. & J. MIELNICZUK, 1997. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 21: 105-112.

BENITES, V. M., A. N. CAIAFA, E.S. MENDONÇA, C. E. G. R. SCHAEFER E J. C. KER. 2003. Solos e vegetação nos complexos rupestres de altitude da Mantiqueira e do Espinhaço. *Floresta Ambiente* 10(1):76-85.

BERTALANFFY, L. V. The theory of open systems in physics and biology. *Science*. Washington, v. 111, p. 23- 29, 1950.

BRANDAO, Pedro Christo et al. Caracterização de geoambientes da floresta nacional do purus, Amazônia ocidental: uma contribuição ao plano de manejo. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 115-126, Feb. 2010. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622010000100013&lng=en&nrm=iso>. Access on 16 Feb. 2021. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000100013>.

CARVALHO FILHO, Amaury de; CURI, Nilton; SHINZATO, Edgar. Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 45, n. 8, p. 903-916, Aug. 2010. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2010000800017&lng=en&nrm=iso>. access on 27 Jan. 2021. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000800017>.

COELHO, M. R., VASQUES, G. M., TASSINARI, D. SOUZA, Z. R.; OLIVEIRA, A. P.; MOREIRA, F. M. S. Solos do Quadrilátero Ferrífero sob Diferentes Coberturas Vegetais e Materiais de Origem. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 130 p. 2017.

DIAS, J. & SANTOS, L. 2007. A paisagem e o geossistema como possibilidade de leitura da expressão do espaço socioambiental rural. *Confins*, n. 1.

Dias, H.C.T.; Fernandes Filho, E.I.; Schaefer, C.E.G.R; Fontes, L.E.F.; Venterim, L.B. 2002. Geoambientes do Parque Estadual do Ibitipoca, município de Lima Duarte-MG. *Revista Árvore*, 26(6):777-786.

EMBRAPA. 2018. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Centro Nacional de Pesquisa de Solo. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3ª Ed. Brasília, 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). 2017. Manual de métodos de análise de solo. 3ª ed., Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 230 p.

FARIA, MAOLA. Candeias (*Eremanthus* sp.): espacialização e interações ambientais no município de Mariana (MG). 2012. 59 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2012.

FERNANDES FILHO E. I., SCHAEFER C. E. G. R., Moniz, R. F.; LOPES, A.; FRANCELINO, M. R.; GOMES L. (2021) The unique and endangered Rupestrian Vegetation complex and protected areas at the Iron Quadrangle in Brazil. Em publicação (submetido: *Journal for Nature Conservation*).

HOPPER, STEPHEN. (2009). OCBIL theory: Towards an integrated understanding of the evolution, ecology and conservation of biodiversity on old, climatically buffered, infertile landscapes. *Plant and Soil*. 322. 49-86. 10.1007/s11104-009-0068-0.

ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Proposta de Criação do Parque Nacional Serra do Gandarela. Setembro, 103p., 2010.

ISA - Instituto Sócio Ambiental, (2015). Características: Parque Nacional da Serra do Gandarela. em: <https://uc.socioambiental.org/> <https://uc.socioambiental.org/arp/5221>. Acesso em: 5 de fev. 2021

JACOBI, C.M., CARMO, F.F. & VINCENT, R.C. 2008. Vegetação sobre canga e seu potencial para reabilitação ambiental no Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Árvore* 32: 345-353.

MARTINS, F.D.; KAMINO, L.H.Y.; RIBEIRO K.T.; Projeto cenários: Conservação de Campos Ferruginosos Diante da Mineração em Carajás. – 1. ed. – Tubarão (SC): Copiart, 2018. 467 p.

Medeiros, R. & Young; C.E.F. 2011. Contribuição das unidades de conservação brasileiras para a economia nacional: Relatório Final. Brasília: UNEP-WCMC, 120p.

MENDONÇA, Bruno & FERNANDES-FILHO, Elpídio & SCHAEFER, Carlos & SIMAS, Felipe & JUNIOR, José & LISBOA, Beatriz & GAIO, Júlia. (2013). Solos e geoambientes do Parque Nacional do Viruá e entorno, Roraima: visão integrada da paisagem e serviço ambiental. *Ciência Florestal*. 23. 10.5902/198050989287.

R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

SALGADO, A.A.R., COLIN, F., NALINI, JR., H.A., BRAUCHER, R., VARAJÃO, A.F.D.C., & VARAJÃO, C.A.C.O., (2010). O Papel da Denudação Geoquímica no Processo de Erosão Diferencial no Quadrilátero Ferrífero/MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Goiania, v.5, n. 1, p. 55-69.

SANTOS, R.D. dos; LEMOS, R.C. de; SANTOS, H.G. dos; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. dos; SHIMIZU, S.H. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 6.ed. rev. e ampl. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 100p.

SANTUCCI, V. L. 2005. Historical Perspectives on Biodiversity and Geodiversity. The George Wright Forum, USA. *Geodiversity & Geoconservation*, 22 (3): p.29-34.

SCHAEFER C.E.G.R, CAMPOS P.V, CANDIDO H.G, CORRÊA G.R, FARIA R.M, VALE Jr JF (2020) Serras e pantanais arenosos: solos e geoambientes em unidade de conservação da Amazônia, Brasil. *Neotropical Biology and Conservation* 15(1): 43-69. <https://doi.org/10.3897/neotropical.15.e49221>

SCHAEFER *et al.*, (2019) Relatório Técnico Preliminar: Mapeamento de Geoambientes do Geossistema Ferruginoso do Sinclinal Gandarela. Convênio entre as empresas Amplo Engenharia e Vale. Belo horizonte, Minas Gerais.

SCHAEFER, C.E.G.R., Corrêa, G.R., Candido, H.G., Arruda, D.M., Nunes, J.A., Araujo, R.W., Rodrigues, P.M.S., Filho, E.I.F., Pereira, A.F.S., Brandão, P.C., Neri, A.V. 2016. The Physical Environment of Rupestrian Grasslands (Campos Rupestres) in Brazil: Geological, Geomorphological and Pedological Characteristics, and Interplays. In: Geraldo Wilson Fernandes. (Org.). *Ecology and 25 Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil*. 1ed.: Springer International Publishing, 563p. 15-53.

SCHAEFER, C. E. G. R., M. A. ALBUQUERQUE, J. C. F. CAMPOS, L. L. CHARMELO & F. N. B. SIMAS, 2000. Elementos da paisagem e gestão da qualidade ambiental. *Informe Agropecuário* 21(202): 20-44.

SHINZATO, E.; CARVALHO FILHO, A. de. Pedologia. In: PROJETO APA Sul RMBH: estudos do meio físico. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2005. v.5, pt.A-B, 53p. (Série programa informações básicas para a gestão territorial - GATE, 5)

SILVA, J.R. & SALGADO, A.A.R. 2009. Mapeamento das unidades de relevo da região da Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Book Geografias* 5 (2): 107-125.

SILVEIRA, F.A.O., NEGREIROS, D., BARBOSA, N.P.U. *et al.* Ecology and evolution of plant diversity in the endangered *campo rupestre*: a neglected conservation priority. *Plant Soil* **403**, 129–152 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2637-8>

SOTCHAVA, V.B. 1977. O estudo de geossistemas. Instituto de Geografia. Universidade Estadual de São Paulo. São Paulo: Ed. Lunar.

SPIER C.A., VASCONCELOS P.M., OLIVIERA S.M.B., $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the evolution of lateritic iron deposits in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil, *Chemical Geology*, Volume 234, Issues 1–2, (2006), Pages 79-104, ISSN 0009-2541, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.04.006>.

TRICART, J. & C. KIEWIET DE JONGE, 1992. *Ecogeography and rural management*. Longman Group, Harlow

TROPMAIR, H. *Biogeografia e Meio Ambiente*. 6ª edição – Rio Claro: Divisa, 2004, 205p.

VARAJÃO, César Augusto Chicarino et al. Estudo da evolução da paisagem do quadrilátero ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (10be) e da pedogênese. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1409-1425, Oct. 2009. Available from: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010006832009000500032&lng=en&nrm=iso>. access on 25 Jan. 2021. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500032>

VARAJÃO, C. A. C. (1991) A questão da correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. São Paulo: *Revista Brasileira de Geociências*. 21(2): 138-145

CAPÍTULO 2

GEODIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE DO PARQUE NACIONAL DA SERRA DO GANDARELA, MINAS GERAIS, BRASIL: UMA METODOLOGIA DE DIÁLOGO.

GEODIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE DO PARQUE NACIONAL DA SERRA DO GANDARELA, MINAS GERAIS, BRASIL: UMA METODOLOGIA DE DIÁLOGO.

RESUMO

A geodiversidade é um conceito bastante atual, e é definida neste trabalho como a diversidade abiótica presente no meio físico, integrada a geologia, a geomorfologia e as características do solo, incluindo seus sistemas e processos associados. Diversos autores vêm buscando mostrar como a geodiversidade tem grande influência nos padrões de biodiversidade, e que ambas variam de forma simultânea em diferentes escalas no espaço e no tempo. No entanto, muitas questões sobre esta relação ainda precisam ser entendidas, e a busca por novos métodos e técnicas capazes de realizar essas análises se tornam cada vez mais necessárias. Neste contexto, este trabalho propôs uma nova metodologia baseada em técnicas adaptadas de processamento de imagens para a aquisição e espacialização automática de índices de geodiversidade, gerados através de mapas com informações do meio físico do Parque Nacional da Serra do Gandarela. Estes índices foram usados posteriormente para entender como a geodiversidade está distribuída dentro dos geoambientes de cada bioma do parque. Os resultados mostraram que, com maior distribuição territorial, os geoambientes dos biomas Mata Atlântica e Cerrado, apresentaram grandes variações nos índices de geodiversidade, já os Campos Rupestres mostram ter forte relação com as áreas de maior geodiversidade, especialmente os ferruginosos. O estudo mostrou como a geodiversidade e a biodiversidade intrínseca nos ambientes poderiam ser usados com uma base inicial para o delineamento de áreas prioritárias para a conservação dentro do parque.

Palavras-chave: Geodiversidade. Biodiversidade. Conservação.

GEODIVERSITY AND BIODIVERSITY CONSERVATION OF THE SERRA DO GANDARELA NATIONAL PARK, MINAS GERAIS, BRAZIL: A DIALOGUE METHODOLOGY

ABSTRACT

Geodiversity is a very current concept, and it is defined in this work as the abiotic diversity present in the environment, integrated with the geology, geomorphology and pedology, including its associated systems and processes. Several authors have been seeking to show how geodiversity has a great influence on biodiversity patterns, and that both vary simultaneously at different scales in space and time. However, many questions about this relationship still need to be understood, and the search for new methods and techniques capable of carrying out these analyzes, becomes increasingly necessary. In this context, this work proposed a new methodology based on techniques adapted from image processing for the acquisition and automatic spatialization of geodiversity indexes, generated through maps with information about the physical environment of the Serra do Gandarela National Park. These indexes were later used to understand how geodiversity is distributed within the geoenvironments of each biome in the park. The results induced that, with greater territorial distribution, the geoenvironments of the Atlantic Forest and Cerrado biomes, showed great variations in the geodiversity indexes, the Campos Rupestres had a strong relation with the areas of greater geodiversity, especially the ferruginous ones. The study showed how geodiversity and intrinsic biodiversity in the geoenvironments can be used as an initial basis for delineating priority areas for conservation within the park.

Key-words: Geodiversity. Biodiversity. Conservation.

1. INTRODUÇÃO

A geodiversidade é um conceito bastante atual, ganhando popularidade no mundo científico no início dos anos 90 (GRAY, 2004, GRAY, 2008, MANOSSO & ONDICOL, 2012, PEREIRA. et al, 2013). Tal conceito sofre distinções entre diferentes autores, que além de abordarem os elementos do meio físico, associam processos sociais históricos e culturais, de acordo com o objetivo da análise de cada pesquisa.

A definição usada neste trabalho foca na diversidade abiótica presente no meio físico, integrada a geologia, a geomorfologia e a pedologia, incluindo seus sistemas e processos associados (GRAY, 2004).

Outro aspecto importante é o postulado há muito subentendido na ecologia da paisagem (NAVEH & LIBERMANN, 1984) e avançada por Xavier-Da-Silva e Carvalho Filho, (2004) e Nunes et al., (2015), de que a biodiversidade encontrada em um determinado ambiente está diretamente associada à sua geodiversidade. Para Erikstad (2014) e Machado e Azevedo (2016), a diversidade natural deve ser interpretada em duas vertentes que se conectam: a biodiversidade e a geodiversidade. Se a biodiversidade é referente à diversidade dos componentes biológicos, a geodiversidade trata da diversidade dos elementos físicos naturais, que suportam o desenvolvimento da vida no planeta terra, ou seja, a própria biodiversidade. Santucci (2005) considera que a biodiversidade possui uma relação direta com a geodiversidade e aponta que a elevada geodiversidade tem sido utilizada como um forte indicativo de maior biodiversidade.

Manosso e Ondicol, (2012), apontam que ao longo dos anos os estudos sobre biodiversidade foram adquirindo grande relevância no meio acadêmico, e passaram a fazer parte de políticas sociais, ambientais e econômicas em todo o mundo, enquanto a geodiversidade passou a ser reconhecida apenas nas últimas décadas, sendo objeto de diferentes áreas da ciência e programas de planejamento governamentais. A biodiversidade conta com um número de publicações científicas desproporcionalmente maior quando comparado à geodiversidade, e isso repercute diretamente nas bases metodológicas para identificação e quantificação da geodiversidade.

A Serra do Gandarela (SG), inserida no Quadrilátero Ferrífero, próximo a região metropolitana de Belo Horizonte, é conhecida por sua grande riqueza geológica e mineral, onde

a atividade mineradora ocorre desde o período colonial brasileiro graças a exploração do ouro, e nos dias atuais principalmente pela extração de minério de ferro. A presença marcante do geossistema ferruginoso na SG traz características peculiares muito importantes aos elementos físicos deste sistema e enriquecem a geodiversidade regional com um todo.

A SG representa um ecótono entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado, representado por um mosaico de ambientes compostos por formações florestais, savânicas e campestres, dispostas em uma paisagem cênica exuberante (ARAÚJO, 2021). Graças ao relevo movimentado e resistência das rochas itabiríticas e quartzíticas, são comuns afloramentos rochosos onde predominam campos rupestres, formações de ocorrência restrita no território brasileira e que apresenta alta taxa de diversidade e muitas espécies endêmicas.

O intuito de preservar partes estratégicas do patrimônio biológico, geológico, espeleológico e hidrológico associado às formações de canga do Quadrilátero Ferrífero (campos rupestres, remanescentes de floresta semi-decidual, as áreas de recarga de aquíferos e o conjunto cênico da paisagem regional) (ISA, 2015), fez com que o ICMBio desenvolvesse estudos que culminaram com a criação do Parque Nacional da Serra do Gandarela (PARNA–SG) em 2014, uma unidade de conservação que abrange parte da SG e áreas do entorno com grande diversidade geoambiental, fazendo do parque um excelente objeto de estudo da geodiversidade desta região, onde os aspectos físicos naturais exercem claramente um controle local sobre as fitofisionomias ao longo da paisagem.

Abordando diferentes objetivos, alguns trabalhos buscaram investigar os aspectos da geodiversidade nesta região. Pereira et al. (2013), buscaram modelar a geodiversidade na Área de Proteção Ambiental Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte (APA Sul RMBH), com o objetivo de quantificar a geodiversidade da APA Sul RMBH por meio de índices, e dessa forma contribuir para gestão territorial baseada nas inferências associadas aos índices calculados. Pereira e Ruchkys (2016), também trabalhando na APA Sul RMBH, buscaram quantificar a geodiversidade aplicada ao geoturismo, selecionando áreas prioritárias para o desenvolvimento do geoturismo na região. Ambos os trabalhos utilizaram metodologias adaptadas do método proposto por Serrano e Ruiz-Flaño (2007). Santos et al. (2018) retrataram o patrimônio espeleológico e suas relações espaciais com aspectos de seu ambiente físico no PARNA-SG, mostrando sua riqueza em termos da geodiversidade associada, fazendo uso dos índices de geodiversidade gerados no trabalho de Pereira et al. (2013). Todos estes trabalhos empregaram a mesma base cartográfica produzida a partir das informações levantada sobre o meio físico, pelo

Projeto Apa Sul RMBH Estudos do Meio Físico (2005), elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

Neste contexto o presente trabalho, propõem uma nova abordagem metodológica para o cálculo de índices de geodiversidade e sua espacialização, utilizando técnicas adaptadas de processamento de imagens, por meio de filtros criados pela aplicação de matrizes quadradas (máscaras), que são empregadas sobre as imagens (mapas) para análise pixel a pixel de toda a área de estudo, gerando valores já espacializados de índices de geodiversidade para cada pixel que compõe a imagem (método de janela móvel). O trabalho testou diferentes tamanhos de janelas, e a que apresentou o melhor desempenho na representatividade dos índices em relação a escala de trabalho foi escolhida com o objetivo de investigar a relação entre os geoambientes do PARNA-SG e a distribuição dos índices de geodiversidade gerados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da Área de Estudo

Localizado na Serra do Espinhaço e inserida mais especificamente no Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, o PARNA-SG tem uma área de 312,7 km², que é compartilhada entre os municípios de Rio Acima, Nova Lima, Itabirito, Raposos, Caeté, Mariana, Ouro Preto e Santa Bárbara (Figura 1)

Na SG ocorrem os divisores entre as bacias do Rio das Velhas (São Francisco) e Bacia do Rio Piracicaba (Rio Doce), importantes na captação de grande parte da água que abastece a Região Metropolitana de Belo Horizonte (ANA, 2010). O clima da região é o Cwa de acordo com classificação de Koppen, possuindo duas estações climáticas bem definidas: verão ameno e úmido e inverno frio e seco, com temperatura média anual de 20° C e a precipitação média de até 2.000 mm dependendo do setor.

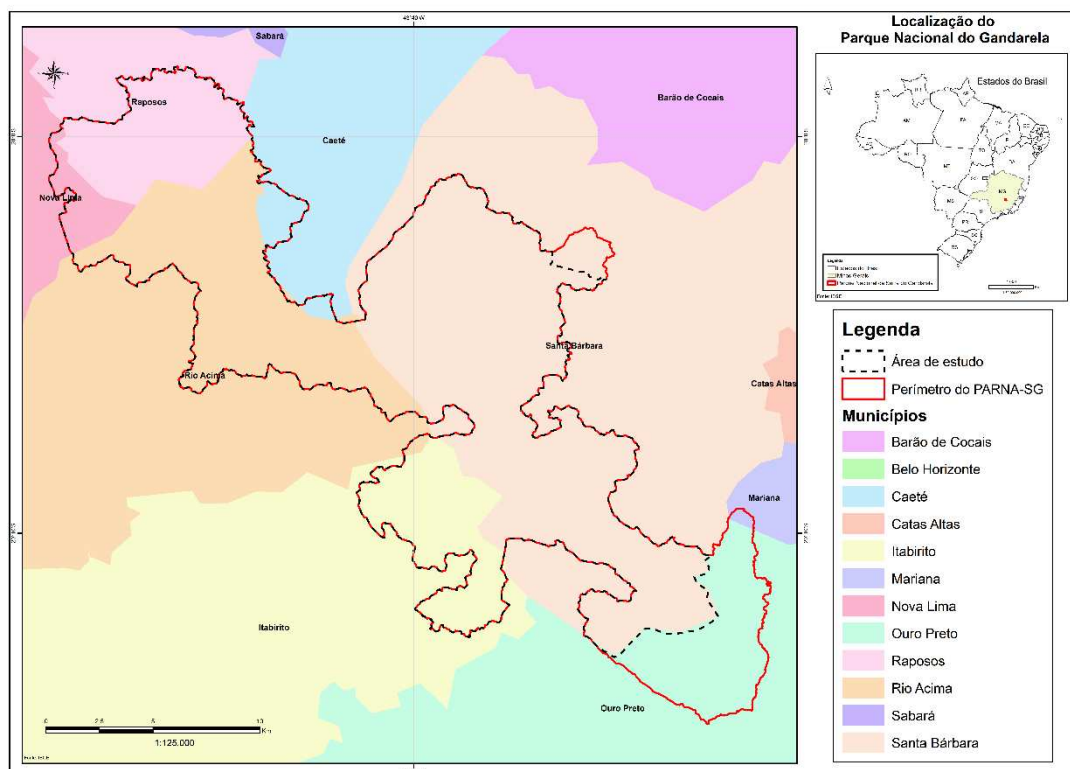


Figura 1. Mapa de Localização do Parque Nacional da Serra do Gandarela (dados baseados no IBGE).

O PARNA-SG está inserido em uma região de geologia diversa e complexa dentro do QF, e que de forma resumida é formada, desde sua base, pelo embasamento cristalino (granitos, gnaisses e migmatitos); sobreposto pelo Supergrupo Rio das Velhas (basicamente quartzitos, xistos e filitos), pelo Supergrupo Minas, (quartzitos, xistos, filitos e formações ferríferas) e finalmente pelo Grupo Itacolomi (basicamente quartzitos) (ALKMIM & MARSHAK, 1998; SILVA & SALGADO, 2009).

Com uma grande diversidade de formas e processos associados, a geomorfologia da região expressa características diretamente ligadas às suas litológicas (PEREIRA & RUCHKYS, 2016) De acordo com Salgado et al. (2010), existe uma denudação geoquímica diferencial na região, onde os quartzitos e Itabiritos são as rochas de maior resistência compondo os topos de serra; os xistos, filitos e granito-gnaisses, têm resistência mediana formando patamares menos elevados e encostas; e por último mármore e dolomitos que apresentam a menor resistência, e compõem regiões mais baixas.

Em levantamento realizado para caracterização dos solos dos geoambientes do PARNA-SG produzido pelo próprio autor, e também em levantamentos realizados por Carvalho Filho et

al. (2010) e Schaefer *et al.*, (2019) em áreas que contemplam grande parte do parque, revelaram o predomínio de solos pouco evoluídos como Plintossolos Pétrico, Cambissolos Háplico e Neossolos Litólicos e Regolíticos em relação a solos mais evoluídos, como os Latossolos. A presença de Plintossolos (solos de longo processo pedogenético) oriundos da exposição erosiva do material ferruginoso, juntamente com o domínio de solos pouco evoluídos com forte influência do material de origem em suas características, apontam para uma preponderância geral dos processos erosivos sobre os pedogenéticos, condicionada pelo relevo movimentado, pela resistência ao intemperismo das rochas e pelo baixo recobrimento da vegetação nas áreas campestres e nos afloramentos rochosos (CARVALHO FILHO *et al.* 2010).

O PARNA-SG está inserido em um ecótono entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica, estas áreas transicionais formam um mosaico de fitofisionomias florestais, savânicas e campestres. Os campos rupestres associados aos afloramentos de canga, itabirito e quartzito abrigam um elevado número de espécies raras (GIULIETTI *et al.* 2009), muitas delas novas para o mundo científico (VIANA & LOMBARDI 2007; JACOBI & CARMO 2008; JACOBI & CARMO 2012).

2.2. Base de Dados e Tratamentos Utilizados no Cálculo dos Índices de Geodiversidade

Este trabalho utilizou as informações sobre o meio físico levantadas pelo Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico (2005), elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), que contempla 276,49 Km², equivalente a 88,18% da área total do PARNA-SG. Foram utilizados os mapas geomorfológicos (unidades de relevo e unidades morfoestrutural), geológico e pedológico, todos na escala 1: 50.000. Os mapas geológico e pedológico analisados apresentam 30 unidades geológicas e 16 unidades pedológicas respectivamente, enquanto os mapas geomorfológicos de unidades de relevo e unidades morfoestruturais apresentam 14 e 16 unidades respectivamente

Todos os mapas foram projetados no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000 (SIRGAS 2000), e cortados de acordo com a área abrangente dos limites do PARNA-SG. Com a área de estudo aferida, os mapas foram importados no formato vetorial para o software R Core Team, e então rasterizados (conversão das imagens no formato vetorial para

o formato matricial (pixels)). Cada pixel do arquivo raster gerado tem resolução espacial de 10 metros (este valor se encontra dentro dos limites testados por Tomislav Hengl, (2006), também para mapas na escala de 1:50.000). A ordem dos tratamentos e operações utilizados no cálculo dos índices de geodiversidade podem ser observado no fluxograma da figura 2.

2.3. Cálculo e Espacialização dos Índices de Geodiversidade

Assim como no trabalho de Pereira et al. (2013), a metodologia aqui abordada se baseou na definição de índices de geodiversidade parciais, calculados de diferentes mapas sendo o Índice geral de Geodiversidade obtido a partir da soma destes índices parciais.

Para o cálculo dos índices de geodiversidade parciais, foi empregada uma técnica adaptada, comumente usada em processamento de imagem para redução de ruídos. A técnica faz uso de filtros, que são criados utilizando matrizes quadradas (máscaras), aplicadas sobre as imagens (mapas) para análise "pixel" a "pixel" de toda a área de estudo, sendo também chamando de método de janela móvel.

Os filtros são capazes de gerar transformações através de operações matemáticas (média, mediana e moda por exemplo) que são aplicadas nos pixels próximos ao pixel central da matriz. O pixel central recebe um novo valor resultante das operações matemáticas aplicadas. A definição da abrangência dos pixels próximos é feita através do tamanho da janela de busca, que é estabelecida pelo operador.

O cálculo dos índices de geodiversidade usando o método de janela móvel foi realizado no programa R Core Team, através da função Focal Janela Móvel ("moving window") do pacote "Raster" (HIJMANS et al, 2020), aplicada sobre os mapas em formato matricial.

Esse método consiste numa janela quadrada, composta por um número ímpar de pixels, onde o pixel central recebe um novo valor considerando o número total de classes do elemento analisado (geologia, geomorfologia e solo) presentes dentro do perímetro formado pela janela, e que são registrados pelos pixels vizinhos. Em seguida o pixel vizinho ao pixel central será analisado, e passará a ser o pixel central da janela, que se desloca sempre em relação ao pixel central com as mesmas dimensões, calculando o índice de geodiversidade da mesma forma, pixel a pixel, até que todos os pixels sejam contemplados. As áreas onde não existem classes como nas

partes externas aos limites do parque, e que eventualmente foram inseridas dentro da janela quando os pixels das áreas periféricas do mapa foram analisados, foram omitidas e não participam da contagem. Neste caso, o pixel central recebe o valor do índice somando as diferentes classes presentes na janela e desprezando a área vazia. Todo o processo foi ilustrado com detalhes nas figuras 3 e 4 abaixo.

Para comparação de resultados gerados por mapas com número de classes diferentes, foi realizada a normalização e a transformação em percentagem dos dados, onde o menor valor encontrado foi considerado 0% e o maior valor 100%, sendo os valores intermediários dispostos dentro desta escala. Este processo foi realizado para os mapas geomorfológicos, geológico e pedológico, gerando os índices parciais de geodiversidade.

Os mapas dos índices parciais de geodiversidade gerados foram somados para a criação de um novo mapa com a os índices gerais de geodiversidade já espacializados:

Mapa índice geral de geodiversidade (%) =

$$\frac{\textit{mapa parcial 1 (\%)} + \textit{mapa parcial 2 (\%)} + \textit{mapa parcial 3 (\%)} + \textit{mapa parcial 4 (\%)}}{4}$$

Os índices de geodiversidade foram distribuídos em quatro classes: baixa (0% - 25%), media (26% - 45%), alta (46% - 65%) e muito alta (66% - 100%). O método foi testado para nove diferentes tamanhos de janela móvel: 21 x 21 pixels, 51 x 51 pixels, 101 x 101 pixels, 151 x 151 pixels, 201 x 201 pixels, 501 x 501 pixels, 1001 x 1001 pixels, 1501 x 1501 pixels e 2001 x 2001 pixels.

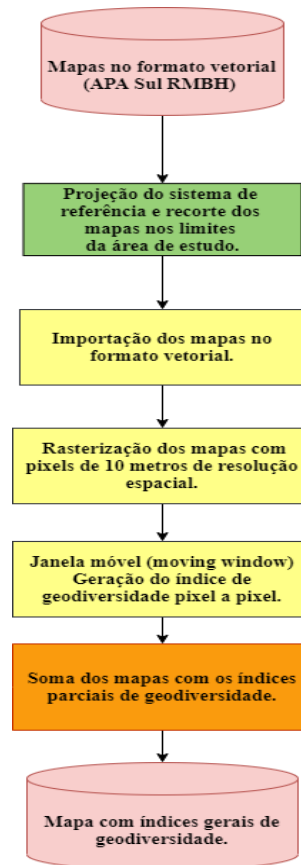


Figura 2. Fluxograma metodológico mostrando a sequência das metodologias aplicadas para o cálculo dos índices de geodiversidade.

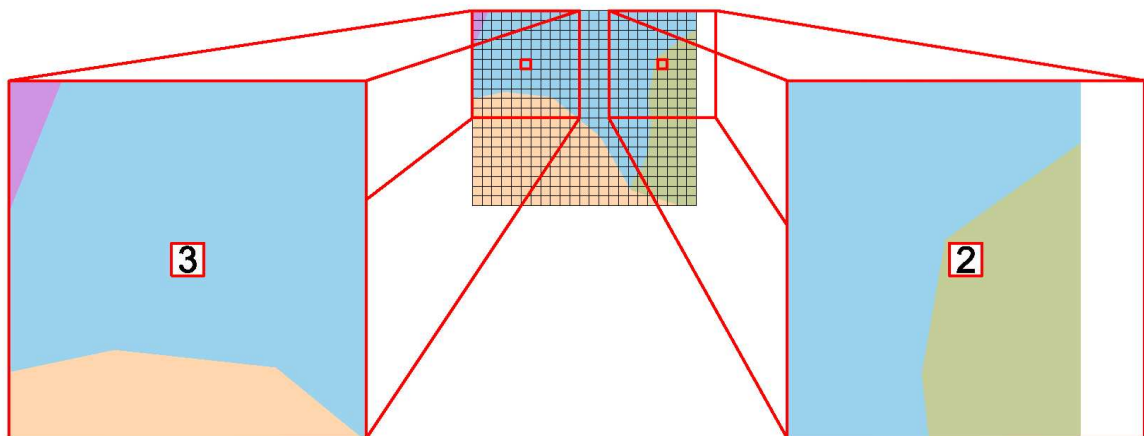


Figura 3. Os índices 3 e 2 representados nos pixels centrais das janelas acima, são o resultado da soma das diferentes classes existentes dentro da janela registradas pelos pixels vizinhos. Nas bordas do mapa (como ilustrado na janela da direita), parte da janela abrange a área externa da imagem, onde as classes em análise não existem, estas áreas são omitidas pelo modelo e o cálculo do índice segue da mesma forma, somando apenas as classes presentes dentro da janela.

Devido à complexidade da área de estudo, a descontinuidade e as grandes variações que os elementos avaliados sofrem dentro desta área, é natural o predomínio de certas classes sobre outras durante a aquisição dos índices de geodiversidade.

É importante o conhecer previamente os elementos usados para gerar os índices de geodiversidade parciais (solos, litologias e relevo) e assim entender quando há distorções entre os índices gerados pelas janelas moveis e a realidade.

Neste trabalho, além de toda as informações e mapas disponibilizados pelo Projeto Apa Sul RMBH Estudos do Meio Físico (2005), foram realizadas diversas visitas técnicas de campo e um levantamento pedológico de todos os geoambientes do PARNA-SG (fruto de um levantamento realizado pelo autor em um diferente trabalho de pesquisa para a mesma área).

É de se esperar índices de geodiversidade mais altos em zonas de relevo complexo, formado por diferentes litologias e com grande diversidade pedológica, enquanto áreas de relevo menos movimentado, formadas por um número reduzido de litologias e com uma cobertura mais homogênea de solos deveriam gerar índices mais baixos de geodiversidade.

É esperado que áreas com índices de muito alta geodiversidade sejam mais raras em relação as demais classes, a geração destes índices depende de uma combinação elevada dos atributos avaliados neste trabalho e a janela móvel ideal deveria registrar esta classe com menor frequência em relação as demais classes.

2.5. Análise da Relação Geoambiente / Geodiversidade no PARNA-SG.

Para investigar a relação entre os geoambientes do PARNA-SG e os índices de geodiversidade encontrados através da metodologia empregada neste trabalho, foi utilizado um mapa de geoambientes produzido pelo autor na escala 1: 10.000 projetado no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000 (SIRGAS 2000) e o mapa com os índices gerais de geodiversidade.

O mapeamento dos geoambientes PARNA-SG levou em consideração o arcabouço geológico do PARNA-SG através da delimitação de três geossistemas principais, onde há o predomínio dos seus respectivos substratos geológicos: Ferruginoso, Quartzítico e Metapelítico. Dentro destes, em nível hierárquico inferior, foram identificados os

geoambientes, as formações vegetais, o relevo e os solos nos diferentes compartimentos da paisagem foram os principais fatores responsáveis pela individualização de cada unidade.

O mapa de geoambientes do PARNA-SG contempla 17 classes de geoambientes (tabela 2), sendo 6 deles pertencentes ao bioma Mata Atlântica, e são representados por ambientes florestados de porte alto e baixo sobre diferentes substratos geológicos e tipos de solo. O Bioma Cerrado é representado por 7 diferentes geoambientes divididos em formações campestres (campo sujo e campos limpos) e formações savânicas (cerrados *stricto sensu* e cerrado rupestre). Os campos rupestres não representam biomas *sensu strictu* pelo ordenamento usado pelo IBAMA, e ocorrem associados a diferentes biomas no Brasil e por isso foram analisados de forma separada. Os campos rupestres foram divididos em abertos e arbustivos, representados por 4 geoambientes associados aos substratos ferruginosos e quartzíticos, como mostrado nas tabelas 1 e 2 abaixo.

Os geoambientes foram compilados dentro dos seus respectivos biomas e os campos rupestres dentro dos seus respectivos geossistemas, gerando um novo mapa de cinco classes, contemplando os geoambientes dos biomas Mata Atlântica, Cerrado, os campos rupestres ferruginosos e quartzíticos e as áreas antropizadas (tabela 1 e figura 9-A).

O novo mapa de biomas/geoambientes foi importado no formato vetorial para o software R Core Team, e então rasterizados com resolução espacial de 10 metros. O cálculo da relação entre a área dos biomas/geoambientes e os índices de geodiversidade do PARNA-SG foi realizado no programa R Core Team, através da função zonal do pacote “Raster” (HIJMANS et al, 2020). Com a “fusão” dos mapas foi possível analisar quantos pixels de cada classe de geodiversidade (baixa, média, alta e muito alta) estavam presente dentro da área de cada bioma/geoambientes. O resultado em pixels foi transformado em porcentagem para facilitar a análise.

Tabela 1. Área ocupada pelos geoambientes de cada bioma dentro da área de estudo no PARNA-SG.

Bioma/Geoambiente	Área (ha)	Área (%)
Mata Atlântica	13781	49.84
Cerrado	9413	34.04
Campo Rupestre Ferruginoso	1655	5.99
Campo Rupestre Quartzítico	1528	5.53
Área Antropizada	1272	4.60

Tabela 2. Geoambientes do PARNA-SG e seus respectivos biomas.

Geoambiente	Bioma
Campo Limpo metapelítico sobre Neossolos /Cambissolos	Cerrado
Campo Limpo quartzítico sobre Neossolos/Cambissolos	Cerrado
Campo Sujo metapelítico sobre Neossolos/Cambissolos	Cerrado
Campo Sujo quartzítico sobre Neossolos/Cambissolos	Cerrado
Cerrado Rupestre quartzítico sobre Neossolos	Cerrado
Cerrado stricto sensu metapelítico sobre Cambissolos	Cerrado
Cerrado stricto sensu quartzítico sobre Cambissolos	Cerrado
Capão Alto ferruginoso sobre Latossolos/Plintossolos	Mata Atlântica
Capão Alto metapelítico sobre Latossolos/Cambissolos	Mata Atlântica
Capão Alto quartzítico sobre Latossolos/Cambissolos	Mata Atlântica
Capão Baixo ferruginoso sobre Plintossolos/Cambissolos	Mata Atlântica
Capão Baixo metapelítico sobre Cambissolos	Mata Atlântica
Capão Baixo quartzítico sobre Cambissolos	Mata Atlântica
Campo Rupestre aberto ferruginoso sobre Plintossolos/Neossolos	Campo Rupestre Ferruginoso
Campo Rupestre arbustivo ferruginoso sobre Plintossolos/Cambissolos	Campo Rupestre Ferruginoso
Campo Rupestre aberto quartzítico sobre Neossolos	Campo Rupestre Quartzítico
Campo Rupestre arbustivo quartzítico sobre Neossolos/Cambissolos	Campo Rupestre Quartzítico

*Optou-se por identificar os Campos Rupestres como Biomas, pela singularidade florística.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Avaliação do método e definição da melhor janela

Com base na abordagem metodológica aplicada, os resultados obtidos para os índices de geodiversidade e sua espacialização estão apresentados e discutidos a seguir.

A tabela 3 e a figura 5 mostram a porcentagem das áreas ocupadas por cada classe de índice de geodiversidade para cada tamanho de janela móvel dentro da área de estudo, e permitiram separar num primeiro momento de acordo com o critério adotado, dois tamanhos de janelas móveis para a segunda fase da análise de escolha.

Tabela 3. Porcentagem das áreas ocupadas por cada classe de índice de geodiversidade, para cada tamanho de janela móvel.

Geodiversidade %	Tamanho da janela em pixel								
	21x21	51x51	101x101	151x151	201x201	501x501	1001x1001	1501x1501	2001x2001
Baixa	94.5	85.9	68.9	55.6	44.5	32.4	24.8	16.5	7.2
Média	5.2	12.7	23.6	29.0	28.4	30.4	21.6	7.5	11.0
Alta	0.3	1.4	6.8	13.8	21.6	30.1	27.6	30.6	16.1
Muito Alta	0.0	0.0	0.7	1.7	5.5	7.1	26.0	45.4	65.7

As janelas de 201 x 201 pixels e 501 x 501 pixels geraram mapas com menos de 50% de suas áreas cobertas pela classe baixa geodiversidade e ou menos de 25% de sua área coberta pela classe muito alta geodiversidade.

A janela de 201 x 201 pixels apresentou 44,5% da área na classe baixa, 28,4% na classe média e 21,6% na classe alta e 5,5% na classe muito alta, enquanto a janela de 501 x 501 pixels apresentou 32,4% da área na classe baixa, 30,4% na classe média, 30,1% na classe alta e 7,1% na classe muito alta, neste segundo caso, chama a atenção como os índices nas classes baixa, média e alta, apresentaram valores próximos a 30% de cobertura da área, o que pode indicar uma possível distribuição equivocada destes índices.

Na segunda fase da análise para a escolha da janela móvel mais adequada para este trabalho, foram comparados os dois mapas selecionados (201 x 201 pixels e 501 x 501 pixels) (figura 6, 7 e 8). Os mapas foram analisados através da observação da distribuição dos índices gerados em relação as características do parque e os elementos formadores da paisagem analisados neste trabalho (litologias, solos e relevo).

É possível notar que a distribuição dos índices nos dois casos apresentam aspectos similares, e concentraram as áreas de maior geodiversidade nas regiões central e sul do parque, e as áreas de menor geodiversidade nas regiões norte e noroeste (figura 6).

Esta é uma característica que corresponde à distribuição real dos elementos formadores da paisagem do parque. O PARNA-SG concentra áreas mais complexas nas regiões central e sul, enquanto nas regiões norte e noroeste do parque ocorre uma maior uniformidade dos elementos analisados, esta relação pode ser observada nos mapas com os índices parciais de geodiversidade (solos, geologia e geomorfologia) das figuras 7 e 8.

A janela de 201 x 201 pixels gerou polígonos que ficaram distribuído de forma moderadamente fragmentada (figura 7), e coincidiram com os limites de muitos atributos avaliados. Este fato pode ser observado com nitidez principalmente nas áreas onde a geodiversidade é mais elevada, como por exemplos a região do Sinclinal Gandarela, localizado na área central do PARNA-SG, onde o platô laterítico mais elevado, com grande diversidade de solos, rochas e formas (alta geodiversidade) se distingui claramente do relevo circundante, com características menos dinâmicas (baixa e média geodiversidade) (Figuras 6 e 7).

Para a mesma região, no mapa concebido pela janela de 501 x 501 pixels, os polígonos gerados não apresentaram formas tão fieis aos limites dos atributos avaliados (figura 8), e avançaram de forma contínua, com baixíssima fragmentação dos polígonos.

A fragmentação dos polígonos foi um fator determinante na escolha da janela mais apropriada. Os polígonos representam os índices de geodiversidade, que por sua vez, são formados pela combinação dos atributos físicos de uma determinada área. Quando estes polígonos ocorrem sem fragmentação, mesmo em locais de elevada diversidade, é um sinal de que a janela móvel utilizada, apesar de ter passado para a segunda fase do processo de escolha, evitando a generalização dos índices extremos (baixo e muito alto), não é apropriada para representar a geodiversidade local, pois os polígonos formados são contínuos e extensos, e não respeitam a descontinuidade natural dos atributos físicos analisados.

Esse comportamento é intensificado com o aumento das dimensões da janela móvel, como mostrado na figura 6 para os mapas de 1001 x 1001 pixels, 1501 x 1501 pixels e 2001 x 2001 pixels.

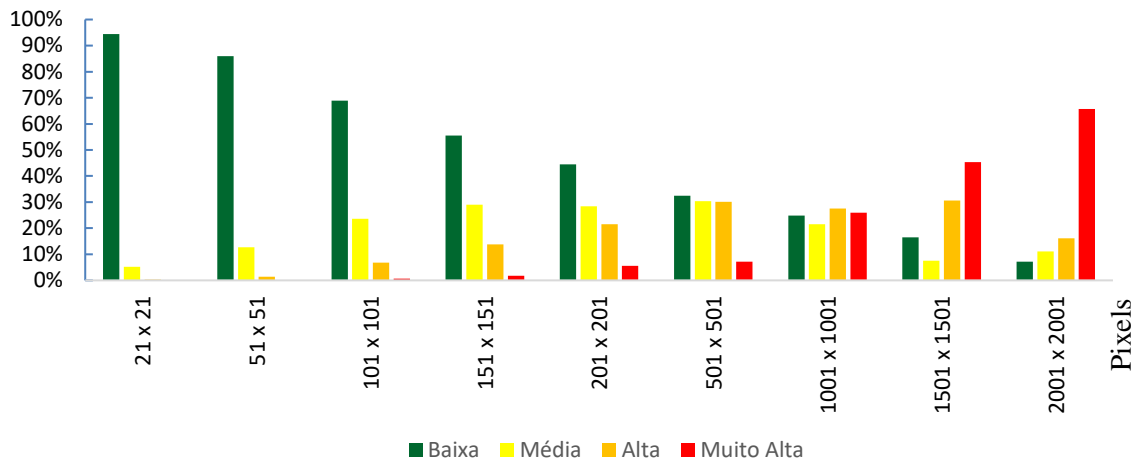


Figura 5. Gráfico da porcentagem das áreas ocupadas por cada classe dos índices de geodiversidade para cada tamanho de janela móvel analisado

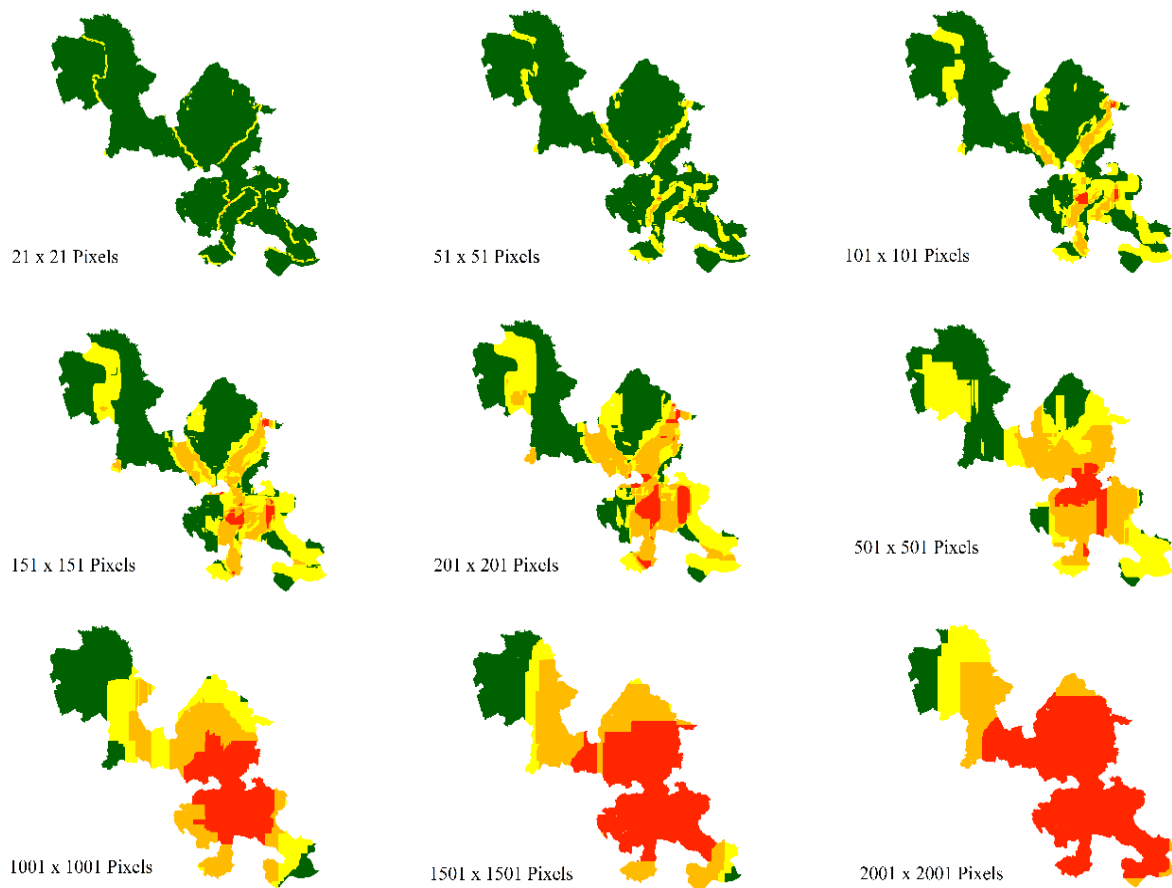


Figura 6. Mapas de índice geral de geodiversidade produzido pela soma dos mapas de índice parcial de geodiversidade, gerado pelos 9 diferentes tamanhos de janela móvel testados: 21 x 21 pixels, 51 x 51 pixels, 101 x 101 pixels, 151 x 151 pixels, 201 x 201 pixels, 501 x 501 pixels, 1001 x 1001 pixels, 1501 x 1501 pixels e 2001 x 2001 pixels. (Cores referentes a geodiversidade - verde = baixa, amarelo = média, laranja = alta e vermelho = muito alta)

Assim, os resultados obtidos através da metodologia aplicada neste trabalho apontaram o uso da janela móvel de 201 x 201 pixels, como a mais adequada para a geração dos índices de geodiversidade para o PARANA-SG. Sendo assim, o mapa gerado pela janela 201 x 201 pixels foi utilizado para a análise da relação entre os geoambientes de cada bioma do PARANA-SG e os índices de geodiversidade gerados.

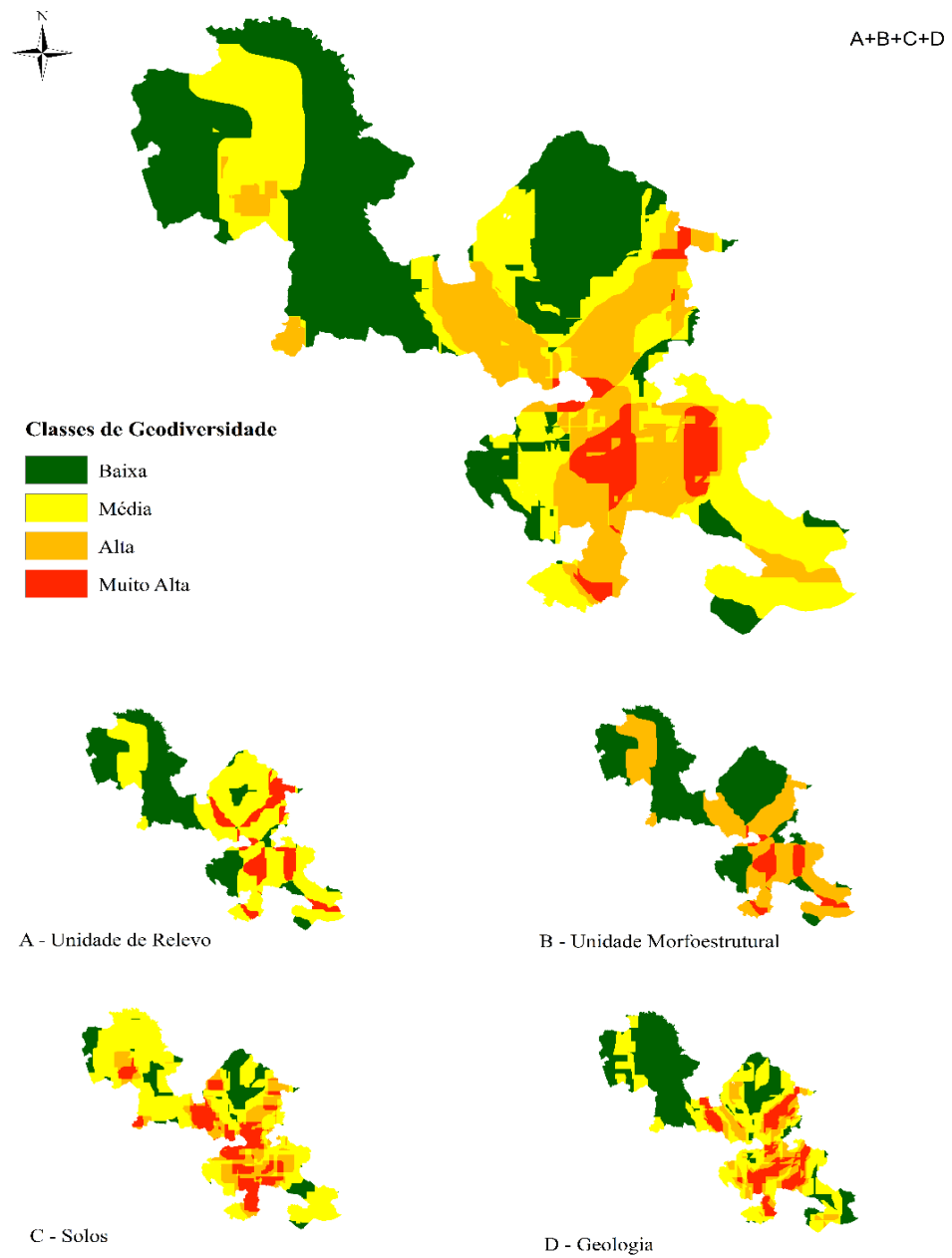


Figura 7. Mapas dos índices parciais de geodiversidade. A - Unidade Morfoestrutural, B - Unidade de Relevo, C - Solos e D - Geologia. A+B+C+D = Mapa dos índices gerais de geodiversidade, gerado por uma janela móvel de dimensão 201 x 201 pixels.

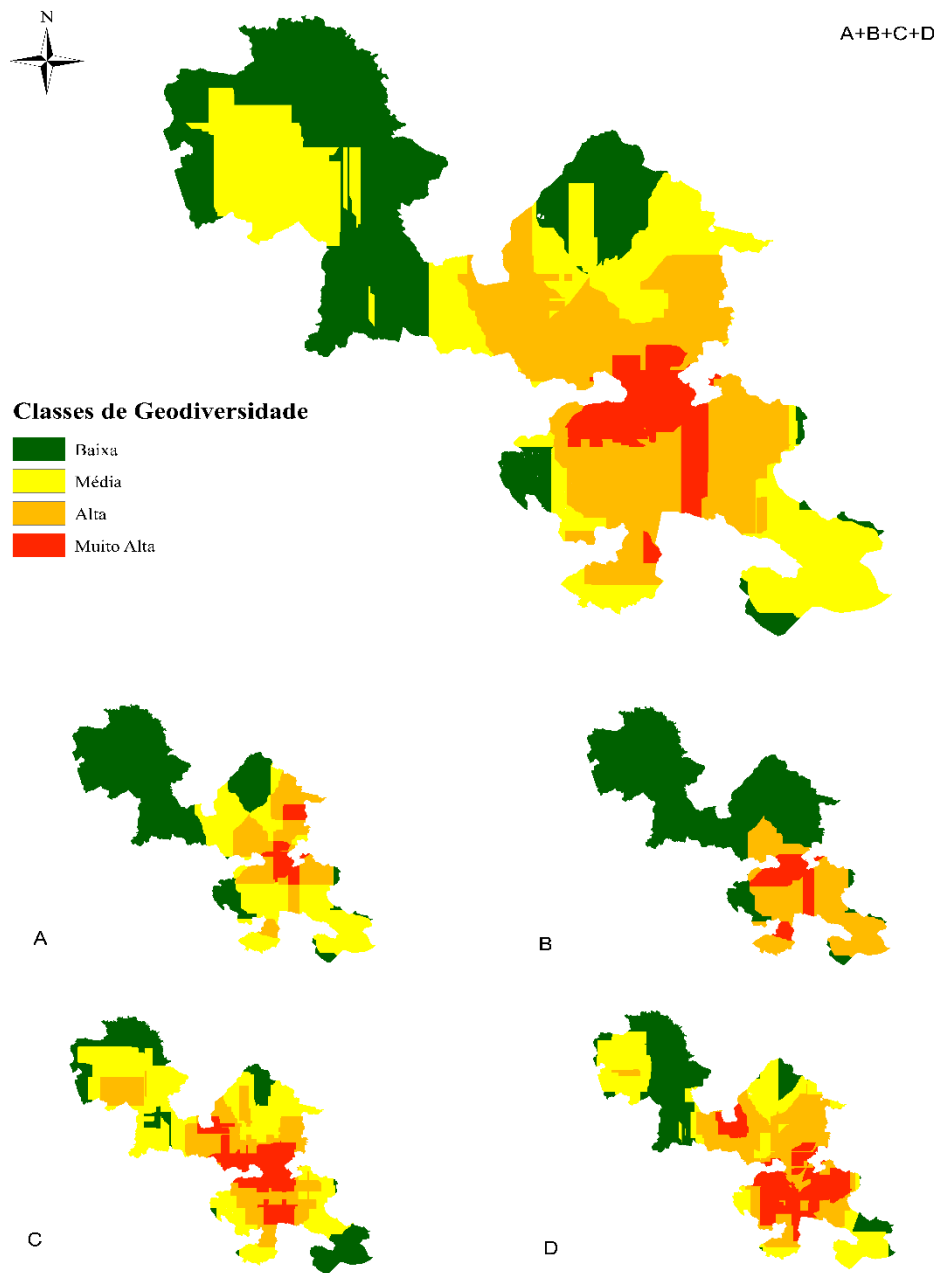


Figura 8. Mapas dos índices parciais de geodiversidade. A - Unidade Morfoestrutural, B - Unidade de Relevos, C - Solos e D - Geologia. A+B+C+D = Mapa dos índices gerais de geodiversidade, gerado por uma janela móvel de dimensão 501 x 501 pixels.

3.2. Relação Geoambiente/Geodiversidade no PARNA-SG

Os resultados obtidos através da “fusão” do mapa de biomas/geoambientes e o mapa de índices gerais de geodiversidade do PARNA-SG (figura 10) mostrou como os índices de geodiversidade se comportam dentro das áreas abrangidas pelos geoambientes do PARNA-SG e possibilitou uma análise das implicações da geodiversidade em relação aos aspectos geoambientais e as atribuições ecológicas desta relação. Os resultados estão apresentados na figura 9 e 10 e nas tabelas 4 e 5 seguidas de suas descrições.

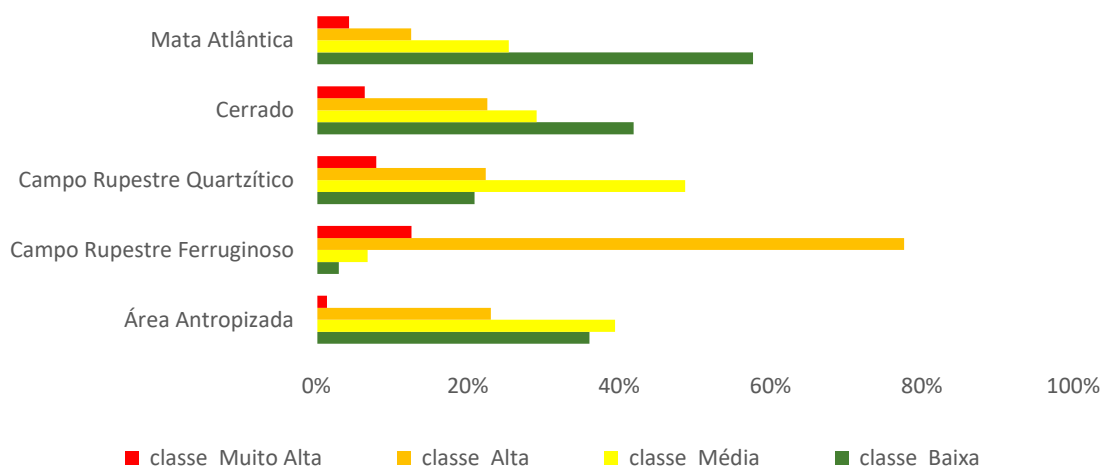


Figura 8. Porcentagem das classes de índices de geodiversidade, dentro de cada bioma/geoambiente analisado.

Os geoambientes do bioma Mata Atlântica, apresentaram 57,7% (7951 ha) da sua área sobre as áreas mapeadas como baixa geodiversidade, 25,4% (3505 ha) nas áreas de média geodiversidade, 12,5% (1728 ha) nas áreas de Alta geodiversidade e 4,3% (597 ha) nas áreas de muito alta geodiversidade. Para os geoambientes do Cerrado, 41,9% (3946 ha) da sua área ocupam regiões mapeadas como baixa geodiversidade, 29,1% (2739 ha) nas áreas de média geodiversidade, 22,6% (2125 ha) nas áreas de Alta geodiversidade e 6,4% (603 ha) nas áreas de muito alta geodiversidade. O Campo Rupestre Quartzítico apresentou 20,9% (320 ha) de sua área mapeada como baixa geodiversidade, 48,8% (745 ha) nas áreas de média geodiversidade, 22,4% (342 ha) nas áreas de Alta geodiversidade e 7,9% (121 ha) nas áreas de muito alta geodiversidade. Já o Campo Rupestre ferruginoso apresentou 3% (49 ha) de sua área mapeada como baixa

geodiversidade, 6,8% (112 ha) nas áreas de média geodiversidade, 77,7% (1285 ha) nas áreas de Alta geodiversidade e 7,9% (208 ha) nas áreas de muito alta geodiversidade. As áreas antropizadas apresentaram 36,1% (459 ha) em áreas mapeadas de baixa geodiversidade, 39,5% (502 ha) nas áreas de média geodiversidade, 23,1% (293 ha) nas áreas de Alta geodiversidade e 1,4% (18 ha) nas áreas de muito alta geodiversidade.

Tabela 4. Porcentagem das classes de índices de geodiversidade, dentro de cada geoambiente analisado.

Bioma/Geoambiente	classe (%)			
	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Mata Atlântica	57.7	25.4	12.5	4.3
Cerrado	41.9	29.1	22.6	6.4
Campo Rupestre Ferruginoso	3	6.8	77.7	12.6
Campo Rupestre Quartzítico	20.9	48.8	22.4	7.9
Área Antropizada	36.1	39.5	23.1	1.4

Os geoambientes do bioma Mata Atlântica representam 13781 ha da área de estudo, e 57% deste total foi classificado como de baixa geodiversidade, estas áreas estão concentradas principalmente na área central do PARNA-SG dentro da depressão do Gandarela, e também distribuídas a noroeste do parque, especialmente nas linhas de drenagem que entalham as formações do Cerrado nos patamares internos e encostas. Proporcionalmente ao tamanho da sua área, os geoambientes da Mata Atlântica apresentaram baixas porcentagens das classes alta e muito alta de geodiversidade (12,5% e 4,3% respectivamente), porém, analisando estas áreas em relação ao seu tamanho em hectares, nota-se a grande relevância que elas têm dentro do parque, totalizando 2325 ha. Estas florestas estão distribuídas na região do Sinclinal Gandarela e associadas aos campos rupestres ferruginosos ao sul do PARNA-SG (figura 10). Nesta área podem ser encontrados fragmentos de floresta primária, muito bem preservados.

Os geoambientes do bioma Cerrado configuram 9413 ha cobrindo principalmente as áreas ao sul e a noroeste do parque (figura 10). Os geoambientes do Cerrado da parte sul do PARNA-SG apresentaram a maior cobertura dos índices das classes alta e muito alta, que totalizaram 2728 ha, este setor do parque apresenta grande diversidade geológica onde existe uma interface entre os geoambientes do Cerrado, campos rupestres quartzíticos e ferruginosos, e geoambientes florestados. No setor noroeste o Cerrado está estabelecido nas áreas de baixa e média geodiversidade, estas duas classes juntas cobrem 6685 ha e representam principalmente as áreas de domínio de rochas metapelíticas e quartzitos impuros, rochas de menor resistência que

formam patamares menos elevados e encostas (VARAJAO, 1991 e SALGADO *et al.*, 2010) criando paisagens abertas e relevo suavizado.

O nível de danos recebido ao longo do tempo, a alta diversidade biológica e o alto grau de endemismo da Mata Atlântica e do Cerrado, os qualificaram como *hotspots* de biodiversidade (Myers *et al.*, 2000) e demandam prioridade na conservação dos seus remanescentes. Apesar de uma vasta área dos geoambientes destes dois biomas serem classificadas como baixa geodiversidade (11897 ha), uma área com proporções semelhantes (11297 ha) concentra-se nas zonas com índices mais elevados de geodiversidade (classes média, alta e muito alta).

Tabela 5. Área em hectares das classes de índice de geodiversidade dentro de cada bioma/geoambiente analisado.

Bioma/Geoambiente	Classe (ha)			
	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Mata Atlântica	7951	3505	1728	597
Cerrado	3946	2739	2125	603
Campo Rupestre Ferruginoso	320	745	342	121
Campo Rupestre Quartzítico	49	112	1285	208
Área Antropizada	459	502	293	18

As Análises mostraram uma forte relação dos campos rupestres com as áreas de maior geodiversidade. Os campos rupestres quartzíticos distribuídos principalmente no setor sul e sudeste do PARNA-SG, apresentaram 20,9% (320 ha) de sua área com baixa geodiversidade, com predomínio das regiões de média geodiversidade (48,8% (745 há)), seguida pelas áreas de alta e muito alta geodiversidade, que juntas somam 30,3% (463 ha) deste geoambiente. Os campos rupestres ferruginosos com apenas 3% (49 ha) de sua área mapeada como baixa geodiversidade, ocupam 1655 ha da área de estudo e estão distribuídos principalmente nas regiões central e centro-sul do PARNA-SG, associadas as rochas e cangas do geossistema ferruginoso (figura 10). Este geoambiente se destaca pelo predomínio das classes alta e muito alta, que representam juntas 85,6% (1493 ha) da área.



Figura 9. Área em hectares das classes de índice de geodiversidade dentro de cada bioma/geoambiente analisado.

A análise da relação entre os geoambientes e os índices de geodiversidade mostraram que os biomas Mata Atlântica e Cerrado apesar de terem proporcionalmente áreas de alta e muito alta geodiversidade reduzidas em relação a essas classes nos campos rupestres, estas zonas abrangem extensões maiores que as próprias áreas cobertas pelos campos rupestres, demonstrando a relevância destes espaços de maior geodiversidade para estes biomas e para o parque como um todo. De acordo com Santucci, (2005), é preciso reconhecer que a geologia é a base dos ecossistemas, e assim assumir a coevolução dos elementos abióticos e bióticos que formam o planeta e seus habitantes. Os índices de geodiversidade deste trabalho consideram os elementos geomorfológicos, geológicos e pedológicos e, portanto, as áreas de geodiversidade elevada concentram um número maior destes elementos. A combinação destes atributos em diferentes zonas da paisagem criam ambientes com oferta variada de recursos, e áreas que podem variar desde pequenos afloramentos rochosos até grandes coberturas florestais, essas diferenças podem ter papel crucial no aumento da diversidade e endemismo de espécies nestes geoambientes. Estudos posteriores poderão investigar a biodiversidade nos geoambientes da Mata Atlântica e Cerrado presentes no parque, e relaciona-los aos índices de geodiversidade encontrados, buscando entender melhor esta relação nesta região tão valiosa para a conservação da biogeodiversidade.

Por outro lado, os campos rupestres mostram uma forte relação entre suas áreas de ocorrência e índices elevados de geodiversidade, especialmente os ferruginosos. A biodiversidade implícita nestes biomas/geoambientes analisados, talvez não seja suficiente para mostrar com clareza a relação dos índices de geodiversidade encontrados neste estudo e a biodiversidade do PARNA-SG, mas trazem à luz uma tendência onde os campos rupestres parecem se beneficiar de zonas de maior geodiversidade.

Silveira *et al.*, (2016) enquadram os campos rupestres à teoria dos OCBILs (paisagens antigas de solos inférteis sob estabilidade climática) de Hopper, (2009), mostrando como solos inférteis sob estabilidade climática, formam a base de uma hipótese geral para explicar riqueza e endemismo de espécies. Esta teoria mostra que os OCBILs apresentam uma forte relação entre biodiversidade e geodiversidade e corroboram com os resultados encontrados. Os solos e a geomorfologia exercem um papel chave na estruturação das Comunidades Vegetais presentes nos Complexos Rupestres Brasileiros (SCHAEFER *et al.*, 2016), A grande variedade de ambientes encontrados nestas áreas como escarpas, ambientes hidromórficos (lagoas e brejos), além de lajeados, e cavernas, favorece o surgimento de condições ecológicas diferentes da paisagem local adjacente (JACOBI *et al.*, 2007), e criam oportunidades para o surgimento de habitats e micro habitats, onde as pressões seletivas estariam conduzindo à especiação e especializações das plantas (BENITES; *et al.* 2007).

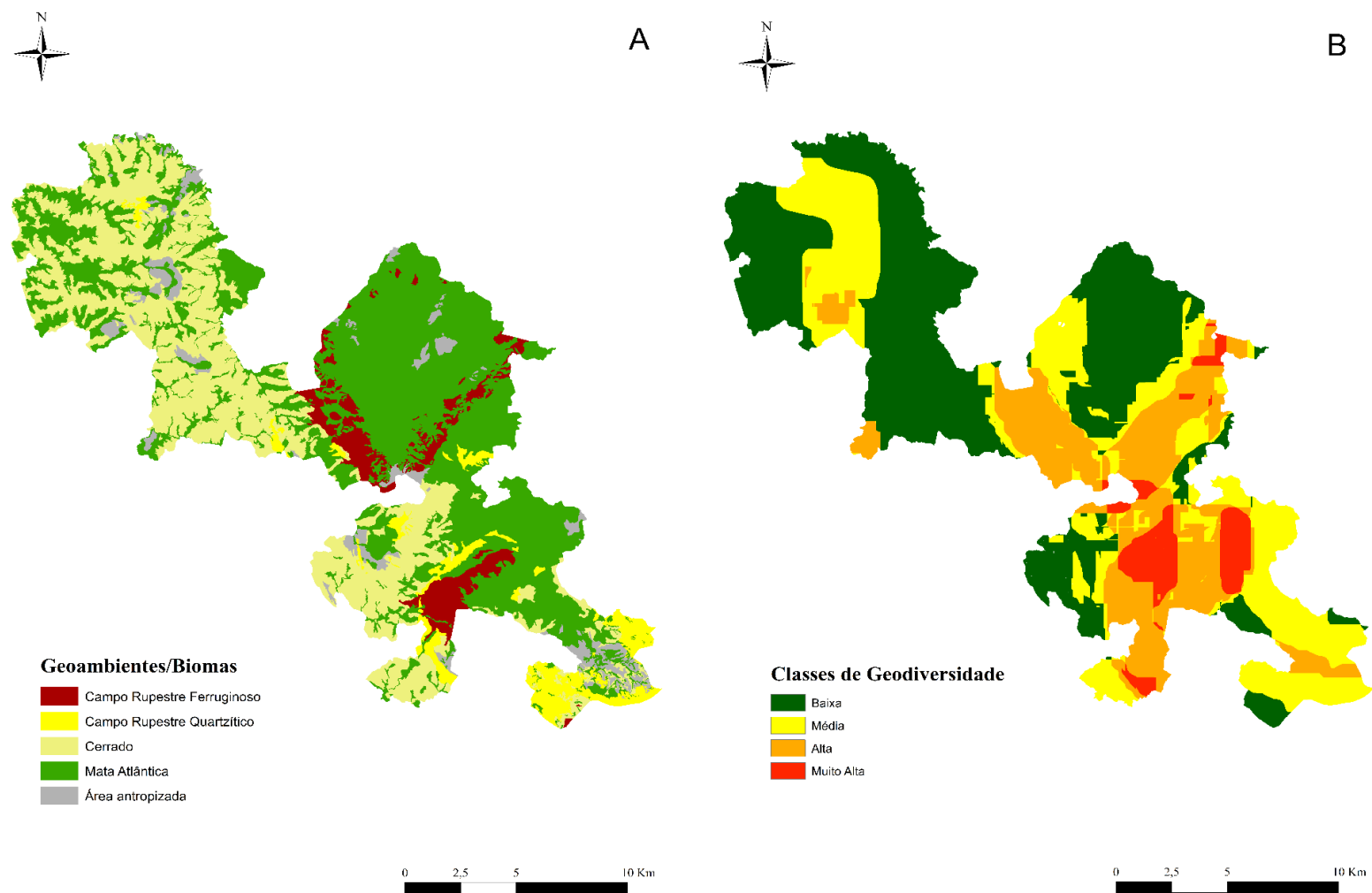


Figura 10. Mapa A – Geoambientes/Biomas PARNA-SG e Mapa B – Mapa de índices gerais de geodiversidade.

4. CONCLUSÕES

Avaliações conjugadas da geodiversidade e biodiversidade são ainda muito insipientes no Brasil, e este trabalho avança na proposição de uma metodologia inédita e adequada para sua avaliação.

O método de janela móvel utilizado neste trabalho se mostrou eficiente no cálculo e espacialização dos índices de geodiversidade do PARNA-SG. Apesar de ser um método automático de fácil reprodução e baixo custo, ainda necessita de ajustes e trabalhos futuros poderão testar o método para diferentes escalas de mapeamento e desenvolvendo novas formas para subsidiar a escolha das janelas mais apropriadas para cada situação de análise.

A janela de 201 x 201 pixels se mostrou a mais adequada para a geração dos índices de geodiversidade na escala dos mapas adotados e resolução espacial dos pixels neste trabalho, e por este motivo foi escolhida para a análise da relação entre os geoambientes de cada bioma presente no parque e a geodiversidade.

A relação geoambiente/geodiversidade mostrou que os campos rupestres têm forte relação com as áreas de maior geodiversidade, especialmente os ferruginosos, indicando uma tendência, onde os campos rupestres parecem se beneficiar de zonas de maior geodiversidade no PARNA-SG.

Os geoambientes dos biomas Mata Atlântica e Cerrado, com ampla distribuição e maior representatividade territorial, apresentaram grandes variações dos índices, mas, ainda assim, tiveram áreas consideráveis com índices de alta e muito alta geodiversidade, mostrando que sistemas florestados altimontanos assim como os campos rupestres, merecem atenção especial, e devem ser alvos de proteção específica e integrada na legislação.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Atlas Brasil. Abastecimento Urbano de Água. Brasília/DF: MMA/ANA, 2010.

ALKMIM, F.F., MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29-58, (1998).

BENITES, V.M.; SCHAEFER, C.E.G.R.; SIMAS, F.N.B. & SANTOS, H.G. Soils associated with rock outcrops in the Brazilian mountain ranges Mantiqueira and Espinhaço. *R. Bras. Bot.*, 30:569-577, 2007.

CARVALHO FILHO, Amaury de; CURI, Nilton; SHINZATO, Edgar. Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v. 45, n. 8, p. 903-916, Aug. 2010. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2010000800017&lng=en&nrm=iso>. Access on 27 jan. 2021. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000800017>

ERIKSTAD LARS. Geodiversity, biodiversity and landscape – key elements in modern nature management strategies. *Geophysical Research Abstracts*. EGU General Assembly. Norwegian institute for Nature. Vol. 16, EGU2014-3961, 2014.

GIULIETTI, A.M.; RAPINI, A.; ANDRADE, M.J.G; QUEIROZ, L.P. & SILVA, J.M.C. (orgs.). 2009. *Plantas raras do Brasil*. Conservation International, Belo Horizonte. 496p.

GRAY, M (2005) *Geodiversity and Geoconservation: What, Why, and How?* *George Wright Forum* 22(3):4–12

GRAY, M. (2008) *Geodiversity: a new paradigm for valuing and conserving geoheritage*. *Geoscience Canada* 35(2/3): 51–59

GRAY, M. (2004). *Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature*.

HIJMANS, Robert J. *Geographic Data Analysis and Modeling [R package raster version 3.4-5]*. 2020.

HOPPER, STEPHEN. (2009). OCBIL theory: Towards an integrated understanding of the evolution, ecology and conservation of biodiversity on old, climatically buffered, infertile landscapes. *Plant and Soil*. 322. 49-86. 10.1007/s11104-009-0068-0.

INSTITUTO SÓCIO AMBIENTAL (ISA), (2015). **Características: Parque Nacional da Serra do Gandarela** em: <https://uc.socioambiental.org/> - <https://uc.socioambiental.org/arp/5221>. Acesso em: 5 de fev. 2021.

JACOBI, C.M. & CARMO, F.F. (orgs.). 2012. Diversidade florística nas Cangas do Quadrilátero Ferrífero. Ed. IDM, Belo Horizonte. 240p.

JACOBI, C.M., CARMO, F.F. & VINCENT, R.C. 2008. Vegetação sobre canga e seu potencial para reabilitação ambiental no Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Árvore* 32: 345-353.

JACOBI, C.M.; Carmo, F.F.; Vincent, R.C.; Stehmann, J.R. 2007. Plant communities on ironstone outcrops – a diverse and endangered Brazilian ecosystem. **Biodiversity and Conservation**, 16: 2185-2200

MACHADO, M. M. M.; AZEVEDO, Úrsula R. de. Essa tal geodiversidade... **Revista da Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, v. 22, n. 1.2, p. 182–193, 2016. DOI: 10.35699/2316-770X.2015.2745. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistadaufmg/article/view/2745>. Acesso em: 1 fev. 2021.

MANOSSO, F.C & ONDICOL, R.P (2012). Geodiversidade: Considerações Sobre Quantificação e Avaliação da Distribuição Espacial. *Anuario do Instituto de Geociencias*. 35. 90-100. 10.11137/2012_1_90_100.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B. & KENT, J. "Biodiversity Hotspots for Conservation Priorities", in *Nature* 403, 2000, pp. 853-8.

NAVEH, Z., LIEBERMAN, A.S. (1984) *Landscape ecology, theory and application*. Springer, New York.

NUNES, Jaquelina A. et al. Soil-vegetation relationships on a banded ironstone 'island', Carajás Plateau, Brazilian Eastern Amazonia. **An. Acad. Bras. Ciênc.**, Rio de Janeiro, v. 87, n. 4, p. 2097-2110, Dec. 2015

PEREIRA, D.I., PEREIRA, P., BRILHA, J. *et al.* Geodiversity Assessment of Paraná State (Brazil): An Innovative Approach. *Environmental Management* **52**, 541–552 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>

PEREIRA, E. O.; RUCHKYS, U. Quantificação e análise da geodiversidade aplicada ao geoturismo na Área de Proteção Ambiental Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte – Minas Gerais. *Ra'e Ga O Espaço Geográfico em Análise*. v.37, 207-226, 2016. DOI: 10.5380/raega.v37i0.41642.

PEREIRA, E.O.; RUCHKYS, U.A.; PELLITERO, R.O. Modelagem da Geodiversidade da Área de Proteção Ambiental Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte. *Geonomos*, Belo Horizonte, v. 21, n .2, p. 97-101, 2013. Disponível em: <<http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geonomos/article/view/277> >. Acesso em 13 de fev. 2021.

SALGADO, A.A.R., COLIN, F., NALINI, JR., H.A., BRAUCHER, R., VARAJÃO, A.F.D.C., & VARAJÃO, C.A.C.O., (2010). O Papel da Denudação Geoquímica no Processo de Erosão Diferencial no Quadrilátero Ferrífero/MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Goiania, v.5, n. 1, p. 55-69, 2004.

SANTOS, D.J.; RUCHKYS, Ú.; TRAVASSOS, L.E.P.; PIZANI, F. M. C. Uso de Técnicas de Geoprocessamento para caracterização geoambiental das áreas de ocorrência do Patrimônio Espeleológico no Geossistema Ferruginoso do Parque Nacional da Serra do Gandarela, Minas Gerais. 2018. *Caderno de Geografia* v.28, n.53. pgs. 362–84. doi:10.5752/p.2318-2962.2018v28n53p362.

SANTUCCI, V. L. 2005. Historical Perspectives on Biodiversity and Geodiversity. The George Wright Forum, USA. *Geodiversity & Geoconservation*, 22 (3): p.29-34.

SCHAEFER *et al.*, (2019) Relatório Técnico Preliminar: Mapeamento de Geoambientes do Geossistema Ferruginoso do Sinclinal Gandarela. Convênio entre as empresas Amplo Engenharia e Vale. Belo horizonte, Minas Gerais.

SCHAEFER, C.E.G.R., Corrêa, G.R., Candido, H.G., Arruda, D.M., Nunes, J.A., Araujo, R.W., Rodrigues, P.M.S., Filho, E.I.F., Pereira, A.F.S., Brandão, P.C., Neri, A.V. 2016. The Physical Environment of Rupestrian Grasslands (Campos Rupestres) in

Brazil: Geological, Geomorphological and Pedological Characteristics, and Interplays. In: Geraldo Wilson Fernandes. (Org.). Ecology and 25 Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil. 1ed.: Springer International Publishing, v., p. 15-53.

SILVA, J.R. & SALGADO, A.A.R. 2009. Mapeamento das unidades de relevo da região da Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, MG. Book Geografias 5 (2): 107-125.

SILVEIRA, F.A.O., NEGREIROS, D., BARBOSA, N.P.U. *et al.* Ecology and evolution of plant diversity in the endangered *campo rupestre*: a neglected conservation priority. *Plant Soil* 403, 129–152 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2637-8>

TOMISLAV HENGL, Finding the right pixel size, *Computers & Geosciences*, Volume 32, Issue 9, 2006, Pages 1283-1298, ISSN 0098-3004, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300405002657>)

VARAJÃO, C. A. C. (1991) A questão da correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. São Paulo: Revista Brasileira de Geociências. 21(2): 138-145

VIANA, P.L. & J.A. LOMBARDI. 2007. Florística e caracterização dos campos rupestres sobre canga na Serra da Calçada, Minas Gerais, Brasil. *Rodriguésia* 58: 159-177.

XAVIER-DA-SILVA, J; CARVALHO FILHO, L. M. Geodiversity: Some simple geoprocessing indicators to support environmental biodiversity studies. *Directions Magazine*, p. 1-4, 2004.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM PARA MAPEAMENTO DOS GEOAMBIENTES DO PARQUE NACIONAL DA SERRA DO GANDARELA, MINAS GERAIS, BRASIL.

MODELAGEM PARA MAPEAMENTO DOS GEOAMBIENTES DO PARQUE NACIONAL DA SERRA DO GANDARELA, MINAS GERAIS, BRASIL.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a performance de 5 modelos de Machine Learning, na classificação supervisionada dos geoambientes do Parque Nacional da Serra do Gandarela em duas situações distintas. Foram testados os modelos Model Averaged Neural Network (avNNet), C5.0, k-Nearest Neighbors (KNN), Random Forest (RF) e Support Vector Machines with Radial Basis Function Kernel (svmRadialSigma) para a classificação de 5 e 9 geoambientes. Os resultados mostraram que os modelos tiveram melhor performance na classificação menos detalhada de 5 classes de geoambientes. O modelo RF foi o que apresentou a melhor performance entre os demais modelos, para ambas as situações de classificação, com 5 e 9 classes. As principais covariáveis para os melhores modelos na classificação de 5 classes foram as espectrais, seguidas das covariáveis morfométricas. Para a classificação de 9 classes houve uma combinação entre as variáveis morfométricas e espectrais. As análises comparativas do mapeamento dos geoambientes gerado pelos modelos e pelo método tradicional, evidenciaram que o modelo RF, apesar de apresentar maiores valores de kappa e acurácia, não mostrou melhor resultado comparativo entre diferentes mapeamentos, delineando os geoambientes modelados de menos representativa do que o modelo svmRadialSigma, na classificação de 5 classes de geoambientes, e o modelo C5.0 na classificação de 9 classes de geoambientes.

Palavras-chave: Machine Learning. Geoambiente. Classificação.

MODELING FOR MAPPING THE GEOENVIRONMENTS OF THE SERRA DO GANDARELA NATIONAL PARK, MINAS GERAIS, BRAZIL.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the performance of 5 Machine Learning models, in the supervised classification of the geoenvironments of the Serra do Gandarela National Park in two different situations. Model Averaged Neural Network (avNNet), C5.0, k-Nearest Neighbors (KKNN), Random Forest (RF) and Support Vector Machines with Radial Base Function Kernel (svmRadialSigma) were tested for a classification of 5 and 9 geoenvironments. The results showed that the models performed better in the less detailed classification of 5 classes of geoenvironment. The RF model showed the best performance among the other models, for both classification situations, with 5 and 9 classes. The main covariables for the best models in the classification of 5 classes were spectral covariables, and just below them in level of importance, there was a predominance of morphometric covariates. For the classification of 9 classes, there was a combination of morphometric and spectral variables among the main covariates. The comparative analyzes of the mapping of the geoenvironments generated by the models and the traditional mapping of geoenvironments, demonstrate that, the RF model, despite having presented the highest values of kappa and accuracy, it did not present the best result comparatively between the mappings, representing the geoenvironments in a slightly less representative way than the svmRadialSigma model in the classification of 5 classes of geoenvironments and the C5.0 model in the classification of 9 classes of geoenvironments.

Key-words: Machine Learning. Geoenvironment. Classification.

1. INTRODUÇÃO

As paisagens brasileiras abrigam uma vastíssima, diversidade de ecossistemas, distribuídos nos domínios de cada bioma presente no território nacional. Por um lado, a distribuição dos biomas depende de relações entre fatores abióticos naturais e elementos bióticos. De acordo com Santucci (2005), existe uma relação intrínseca entre diversidade biológica e diversidade abiótica, onde o alicerce geológico representa a base do ecossistema, com recursos e processos a ele associados, sustentando relações muito íntimas com recursos bióticos e os biosistemas do que tem sido reconhecido tradicionalmente.

Os estudos da paisagem, desde pioneiros como Humboldt (1769-1859) e Dokuchaev (1846-1903), buscaram trazer uma ideia da unidade natural, e revela a importância da compreensão do todo formado pela relação entre os distintos componentes da natureza (MEDEIROS et al., 2018), inspirando novos trabalhos que buscaram uma visão integrada da natureza com um viés holístico, preocupados em sistematizar as interações complexas entre os componentes da natureza, e classificá-los a partir de suas diferenças, apresentadas em tridimensionalidade, sendo passíveis de delimitação (CAVALCANTI, 2013 e MEDEIROS et al., 2018).

A análise integrada da paisagem por meio do método geossistêmico utiliza elementos da Teoria Geral dos Sistemas (Bertalanffy, 1950) e tem a capacidade analítica dos processos naturais responsáveis pela organização dos elementos da paisagem. Para Sotchava (1977), os geossistemas são sistemas territoriais naturais, que se distinguem no envoltório geográfico em diversas ordens dimensionais, e são constituídos de componentes naturais intercondicionados e interrelacionados em sua distribuição e se desenvolvem no tempo, como parte do todo. DIAS & SANTOS (2007) descrevem esta visão dos geossistemas como a combinação entre os fatores geológicos, climáticos, geomorfológicos, hidrológicos e pedológicos, em associação com os fatores biológicos e antrópicos.

Neste trabalho os geossistemas são separados à partir do arcabouço geológico da área de estudo, seguido em nível hierárquico inferior os geoambientes de cada geossistema. No contexto deste trabalho, o termo "geoambiente" é definido como o ambiente geográfico numa dada extensão territorial que apresenta homogeneidade com relação a determinados fatores ambientais de interesse, ou a maioria deles (DIAS et al., 2002). Os fatores ambientais em questão dizem respeito às características geológicas, pedológicas, geomorfológicas e

vegetacionais, sendo as unidades geoambientais mapeadas através da estratificação do meio físico em função combinada destes atributos.

Diversos trabalhos realizados em unidades de conservação no Brasil (SCHAEFER et al. 2020, MENDONÇA et al. 2013, BRANDAO et al. 2010, DIAS et al., 2002), seguindo o método ecogeográfico de Tricart & Kiewiet de Jonge, (1992); modificado por Schaefer et al. (2000), são alguns exemplos de estudos com ênfase em geoambientes.

Este método de mapeamento utiliza a análise prévia de mapas geológicos locais, onde a geologia é compilada e agrupada com a finalidade de delimitação dos geossistemas. Visitas sistematizadas a campo buscando cobrir toda a área de estudo são feitas com o intuito de classificar os solos, as fitofisionomias e o relevo de cada área amostral dos geoambientes, possibilitando o entendimento do limite ocupado por cada unidade geoambiental, e suas relações com unidades limítrofes. Com os padrões aferidos em campo, a digitalização do mapa de geoambientes é realizada manualmente, utilizando como base, imagens de sensoriamento remoto de alta resolução e as referências de campo georreferenciadas sobre a imagem. Este é um método bastante trabalhoso e que pode gerar “bias” ao longo de sua execução.

A capacidade fotointerpretativa permitiu uma evolução no processo de desenvolvimento metodológico para extração de informações de produtos fotográficos, explorando os aspectos tonais, texturais, geométricos e contextuais das imagens (VENTURIERI & SANTOS, 1998). Métodos de classificação digital de imagens de sensoriamento remoto têm obtido êxito em mapeamentos relacionados a diferentes temáticas. Estes métodos são capazes de reconhecer padrões nas imagens, usando determinados parâmetros estatísticos para obter os dados gerados por esses padrões.

Os métodos de classificação digital são agrupados conforme a presença ou ausência de uma fase de treinamento, onde o analista interage com o computador (VENTURIERI & SANTOS, 1998). A classificação supervisionada depende de amostras (conhecimento prévio) do tema a ser classificado, enquanto a classificação não supervisionada é realizada de maneira totalmente automatizada (FRANÇA et al, 2009). O classificador supervisionado utiliza algoritmos baseados na distância estatística e limiar para reconhecer padrões na imagem, sendo necessário disponibilizar ao algoritmo um banco de amostras das classes de interesse para fins de treinamento. O classificador não supervisionado faz a divisão dos pixels da imagem pela semelhança espectral e realiza o agrupamento em classes (cluster) (FARIA, 2015).

Algoritmos de Machine Learning (ML) têm demonstrado excelente desempenho na análise de bases de dados de Sensoriamento Remoto que apresentam grande complexidade (SOUZA et al., 2016, LI et al., 2013) como por exemplo no mapeamento digital de solos e vegetação.

Técnicas de Mapeamento Digital do Solo apresentaram grande evolução nas últimas décadas e se mostraram eficientes na produção de informações espaciais (MCBRATNEY et al., 2003). Estes modelos permitem a criação de mapas de distribuição espacial do solo por meio de modelos numéricos que levam em consideração as covariáveis ambientais, que permitem inferências das variações espaciais e temporais dos tipos de solo e de suas propriedades (MEIER et al., 2018, LAGACHERIE & MCBRATNEY, 2007), sendo estes critérios relevantes para a separação e mapeamento tradicional dos geoambientes (estratificação em função da geologia, relevo, fitofisionomia e solos).

Neste sentido, este trabalho propôs o uso de modelos de ML, aplicada à classificação supervisionada dos geoambientes, formadores da paisagem do Parque Nacional da Serra do Gandarela (PARNA-SG). Considerando cada variável importante na delimitação destas unidades geoambientais e imagens de alta resolução, foi possível testar 5 modelos de ML: Model Averaged Neural Network (avNNet), C5.0, k-Nearest Neighbors (KKNN), Random Forest (RF) e Support Vector Machines with Radial Basis Function Kernel (svmRadialSigma) para duas situações distintas: primeiro, um mapeamento mais detalhado, com 9 classes de geoambientes escolhidos à priori: 1 - Área antropizada (Abrange plantios de eucalipto, áreas de agricultura e mineração), 2 - Campo Limpo, 3 - Campo Rupestre Aberto, 4 - Campo Rupestre Arbustivo, 5 - Campo Sujo, 6 - Capão Alto, 7 - Capão Baixo, 8 - Cerrado Rupestre e 9 - Cerrado Strictu Sensu, e um mapeamento um pouco menos detalhado com 5 classes pré-definidas distintas: 1 - Área antropizada, 2 - Campo Limpo/Campo Sujo, 3 - Campo Rupestre aberto e arbustivo, 4 - Capão Alto/Baixo e 5 - Cerrado stricto sensu/Rupestre.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da Área de Estudo

O Parque Nacional da Serra do Gandarela (PARNA-SG), está localizado na Serra do Espinhaço, inserida mais especificamente no Quadrilátero Ferrífero (QF), e possui área total de 312,7 km², compartilhada entre os municípios de Rio Acima, Nova Lima, Itabirito, Raposos, Caeté, Mariana, Ouro Preto e Santa Bárbara (Figura 1) Este trabalho utilizou as informações sobre o meio físico levantadas pelo Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico (2005), elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), que contempla 276,49 Km², que equivale a 88,18% da área total do parque.

No PARNA-SG ocorrem os divisores entre as bacias do Rio das Velhas (São Francisco) e Bacia do Rio Piracicaba (Rio Doce), importantes na captação de grande parte da água que abastece a Região Metropolitana de Belo Horizonte (ANA, 2010). O clima da região é o Cwa de acordo com classificação de Köppen, possuindo duas estações climáticas bem definidas: verão ameno e úmido e inverno frio e seco, com temperatura média anual de 20° C e a precipitação média de até 2.000 mm dependendo do setor (ICMBio, 2010).

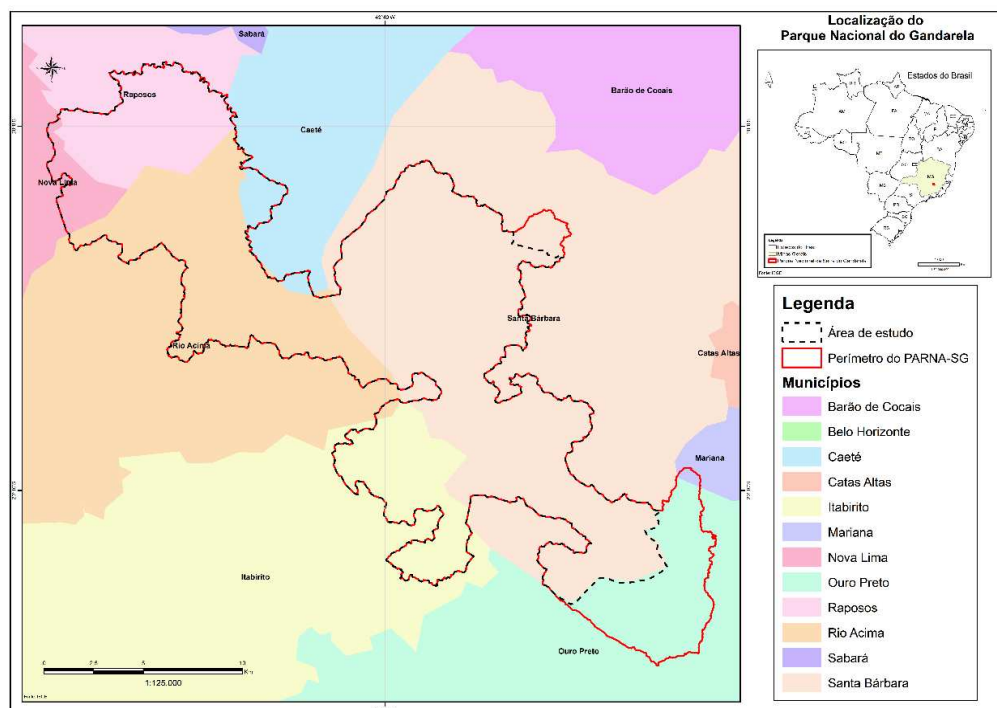


Figura 2. Mapa de Localização do Parque Nacional da Serra do Gandarela e municípios integrantes (dados baseados no IBGE).

O PARNA-SG está inserido em uma região de geologia diversa e complexa dentro do QF, podendo ser resumida, desde sua base, pelo embasamento cristalino (granitos, gnaisses e migmatitos); sobreposto pelo Supergrupo Rio das Velhas (basicamente quartzitos, xistos e filitos), pelo Supergrupo Minas, (quartzitos, xistos, filitos e formações ferríferas) e finalmente pelo Grupo Itacolomi (basicamente quartzitos) (ALKMIM & MARSHAK, 1998; SILVA & SALGADO, 2009).

De acordo com Varajão, (1991) e Salgado et al. (2010), existe uma denudação geoquímica diferencial na região, onde os quartzitos e Itabiritos são as rochas de maior resistência que compõem os topos de serra, enquanto os xistos, filitos e granito-gnaisses, têm resistência mediana formando patamares menos elevados e encostas, por fim, mármore e dolomitos apresentam a menor resistência, e compõem as paisagens mais rebaixadas, submetidas a profunda dissolução.

O parque se localiza em região ecotonal entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado, que coexistem e se sobrepõem em áreas transicionais, formando um mosaico de formações florestais, savânicas e campestres. Graças ao relevo movimentado e o alta resistência ao intemperismo de muitas rochas da área estudada, são comuns afloramentos rochosos e canga endurecida, onde predominam campos rupestres, vegetação de grande valor ecológico para a conservação da biodiversidade, com muitos endemismos (SCHAEFER et al. 2016).

2.2. Metodologia de modelagem e predição de Geoambientes

2.2.1. Definições Gerais

O processo de modelagem foi realizado através de métodos de classificação supervisionada e automatizada, que utilizam ML e métodos estatísticos para escolha dos melhores algoritmos de classificação.

2.2.2. Aquisição das covariáveis

Buscou-se utilizar o máximo de covariáveis que representassem os aspectos responsáveis pela estratificação dos geoambientes, contendo características morfométricas, geomorfológicas, fitofisionômicas (covariáveis espectrais), geológicas, pedológicas e geossistêmicas.

Todas as covariáveis tiveram resolução de 30 metros ou foi aplicado processo de amostragem para 30 metros.

2.2.2.1. Covariáveis espectrais (Imagem de Satélite)

As covariáveis espectrais foram obtidas através do sensor OLI (Operational Land Imager), sendo utilizadas as bandas do visível RGB (Bandas 4, 3 e 2) e infravermelho próximo (Banda 5). Para comparação dos períodos de chuva e seca, foram utilizadas imagens dos meses de março de 2020 (período chuvosos) e agosto de 2020 (período seco). As imagens tiveram processamento para correções atmosféricas. As bandas de satélite processada foram utilizadas para criação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Eq.1), para os dois períodos utilizados.

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} = \frac{band\ 5-band\ 4}{band\ 5+band\ 4} \quad (1)$$

2.2.2.2. Covariáveis morfometrias

A geração das covariáveis morfometrias/topográficas foram realizadas a partir do modelo digital de elevação usando a interface RStudio e software R versão 4.00, com uso das bibliotecas RSAGA (Brenning, 2008), rgrass7 (BIVAND et al., 2016) e raster (HIJMANS, et al., 2015) gerando 52 covariáveis.

Tabela 1. Variáveis de terreno geradas a partir do modelo digital de elevação

Atributos de terreno	Abreviações	Breve descrição
Aspect	AS	Slope orientation
Convergence index	CI	Convergence/divergence index in relation to runoff
Cross sectional curvature	CSC	Measures the curvature perpendicular to the down slope direction
Diurnal anisotropic heating	DAH	Continuous measurement of exposure dependent energy
Easternness	EAST	$\sin(\text{Aspect})$
Flow line curvature	FLC	Represents the projection of a gradient line to a horizontal plane
General curvature	GC	The combination of both plan and profile curvatures
Hill	HI	Analytical hill shading
Hill index	HIINDEX	Analytical index hill shading
Longitudinal curvature	LC	Measures the curvature in the down slope direction
Mass balance index	MBI	Balance index between erosion and deposition
Maximal curvature	MAXC	Maximum curvature in local normal section
Mid-slope position	MSP	Represents the distance from the top to the valley, ranging from 0 to 1
Minimal curvature	MINC	Minimum curvature for local normal section
Multiresolution index of ridge top flatness	MRRTF	Indicates flat positions in high altitude areas
Multiresolution index of valley bottom flatness	MRVBF	Indicates flat surfaces at bottom of valley
Normalized height	NH	Vertical distance between base and ridge of normalized slope
Northernness	NORTH	$\cos(\text{Aspect})$
Plan curvature	PLANC	Described as the curvature of the hypothetical contour line passing through a specific cell
Profile curvature	PROC	Describes surface curvature in the direction of the steepest incline
Real surface área	RSA	Actual calculation of cell area
Slope	S	Represents local angular slope
Slope height	SH	Vertical distance between base and ridge of slope
Slope Index	SI	Represents a local angular slope index
Solrad Diffuse1	SolDiffuse1	Insolation Diffuse for the month of January
Solrad Diffuse2	SolDiffuse2	Insolation Diffuse for the month of July

Continua...

Attributos de terreno	Abreviações	Breve descrição
Solrad dur 1	SolDur1	Insolation Duration for the month of January
Solrad dur 2	SolDur2	Insolation Duration for the month of July
Solrad Direct1	SolDiret1	Insolation Direct of month January
Solrad Direct2	SolDiret2	Insolation Direct of the month of July
Solrad Ration1	SolRation1	Ratio between direct Insolation and diffuse Insolation of the month of January
Solrad Ration2	SolRation2	Ratio between direct Insolation and diffuse Insolation of the month of July
Solrad Sunrise1	SolSunrise1	Mean sunrise time of month January
Solrad Sunrise2	SolSunrise2	Mean sunrise time of month July
Solrad Sunset1	SolSunset1	Mean sunset time of month January
Solrad Sunset2	SolSunset2	Mean sunset time of month July
Solrad total1	SolTotal1	Total Insolation for the month of January
Solrad total2	SolTotal2	Total Insolation for the month of July
Standardized height	STANH	Vertical distance between base and standardized slope index
Surface specific points	SSP	Indicates differences between specific surface shift points
Tangential curvature	TANC	Measured in the normal plane in a direction perpendicular to the gradient
Terrain ruggedness index	TRI	Quantitative index of topography heterogeneity
Terrain surface convexity	TSC	Ratio of the number of cells that have positive curvature to the number of all valid cells within a specified search radius
Terrain surface texture	TST	Splits surface texture into 8, 12, or 16 classes
Total curvature	TC	General measure of surface curvature
Topographic position index	TPI	Difference between a point elevation with surrounding elevation
Valley depth	VD	Calculation of vertical distance at drainage base level
Valley	VA	Calculation fuzzy valley using the Top Hat approach
Valley Index	VA	Calculation fuzzy valley index using the Top Hat approach
Vector ruggedness measure	VRM	Measures the variation in terrain roughness
Topographic wetness index	TWI	Describes the tendency of each cell to accumulate water as a function of relief

2.2.2.3. Outras Covariáveis utilizadas

O conjunto de covariáveis restantes (4) são categóricas e apresentam características relacionadas aos solos, a geologia, a geomorfologia e aos geossistemas.

2.2.3. Coleta de amostras dos geoambientes

As coletas de amostra/polígonos foram realizadas com o uso de imagens de satélite, aliadas ao conhecimento de especialistas da área, que em campo levantaram informações que serviram com guia na condução da amostragem dos geoambientes. A coleta das amostras em cada classe, foi feita de forma balanceada, mantendo-se o mesmo número de amostras para cada categoria de geoambiente. Cada amostra coletada contém 9 pixels, que formam um polígono com uma estrutura de 3x3 pixels. A coleta deste polígono de 9 pixels foi importante para a avaliação da variabilidade geoambiental nas covariáveis usadas, gerando resultados com melhor qualidade e exatidão.

Para fins de comparação de resultados, foram testadas duas situações distintas de classificação: Um sistema mais generalista com 5 classes de geoambientes e um sistema mais detalhado contendo 9 classes de geoambientes. As amostras coletadas foram utilizadas para extração dos dados de conjunto das covariáveis usadas, formando um banco de dados base para uso no processo de ML.

2.2.4. Seleção de covariáveis

A redução/seleção do número de covariáveis tem como base a redução do custo computacional e redução da complexidade do modelo final (parcimônia) (SEASHOLTZ e KOWALSKI, 1993, L. ZHANG et al., 2020, GOMES et al., 2019, SOUZA et al., 2020). O processo de seleção de covariáveis é realizado em três etapas: remoção de covariáveis sem variância, seleção de covariáveis por correlação e seleção de covariáveis por importância.

A remoção de covariáveis sem variância se faz necessária para redução do custo computacional, visto que covariáveis com esta característica, apresentam ganhos nulos na

performance dos modelos, e levam a um aumento das operações computacionais. Nesta fase, nenhuma covariável foi eliminada para os dois conjuntos de classes avaliados, sendo feito na sequência a seleção por correlação.

A seleção de covariáveis por correlação é feita através do cálculo da correlação entre as covariáveis, para isso, foi utilizada a correlação de Spearman, avaliando as duplas que obtiveram correlação superior ou igual a 95%. As duplas acima desse valor foram avaliadas em relação a colinearidade com as outras covariáveis usadas (Multicolinearidade), eliminando-se as covariáveis que apresentaram maior valor de Multicolinearidade. Este passo é feito pela função `findcorrelation` do pacote `Caret` (KUHNS et al., 2020). Nesta fase foram eliminadas 14 covariáveis para predição de 5 classes e 13 covariáveis para predição de 9 classes (Tabela 2). As covariáveis que passaram pelo processo de seleção por correlação foram unidas aos valores das classes dos geoambientes, sendo aplicado a separação dos dados de treinamento (75%) e de teste (25%). A separação destes grupos foi realizada através da função `create_folds_polygon` do pacote `labegeo`. A função `create_folds_polygon` separa os grupos de treinamento e teste de forma que os pixels do polígono amostral coletado, irão exclusivamente para o treinamento ou para o teste, evitando que amostras do mesmo polígono sejam usadas no treinamento e no teste simultaneamente, o que poderia levar a resultados de performance dos modelos superiores a realidade.

Tabela 2. Variáveis removidas pelo processo de seleção por correlação

Covariáveis removidas para predição de 5 classes	Covariáveis removidas para predição de 9 classes
Banda do canal azul do período de seca	Banda do canal azul do período de seca
Banda do canal vermelho do período de seca	Cross sectional curvature
Cross sectional curvature	Hill
General curvature	Longitudinal curvature
Hill	Mass balance index
Longitudinal curvature	Multiresolution index of valley bottom flatness
Plan curvature	Real surface área
Real surface área	Solrad Diffuse1
Solrad Diffuse1	Solrad Direct2
Solrad Direct1	Solrad Ration2
Solrad Ration2	Solrad total1
Solrad total2	Terrain ruggedness index
Terrain ruggedness index	Valley Index
Valley	

A Seleção de covariáveis por importância é realizada através da técnica Recursive Feature Elimination (RFE), esta técnica do tipo backward, que remove covariáveis a partir da importância das mesmas na predição do fenômeno natural estudado, usando um algoritmo base (ex: Random Florests, Support Vetor Maquina, Redes Neurais, Regressão linear, ext) (KUHN e JOHNSON, 2013). Os resultados gerados no RFE são específicos para cada algoritmo, sendo necessário a aplicação dessa técnica para cada algoritmo que se deseja testar. O RFE foi rodado com o grupo total de variáveis do conjunto que passou pelo processo de seleção por correlação e 23 subconjuntos de preditores: 5,6,7 ...20,25, e 30 preditores.

A seleção do subconjunto de preditores ótimo foi baseado na validação cruzada com 10 folds, 5 valores de cada um dos hiperparâmetros internos de cada algoritmo testado (tuneLength). Os hiperparâmetros de cada algoritmo estão descritos no manual do pacote Caret no capítulo 6. “Modelos descritos” disponível em: <https://topepo.github.io/caret/train-models-by-tag.html>. A métrica para escolha do melhor subconjunto para cada modelo foi a Kappa. Foram testados cinco algoritmos; Model Averaged Neural Network (avNNNet), C5.0, k-Nearest Neighbors (KKNN), Random Forest (RF) e Support Vector Machines, com Radial Basis Function Kernel (SVMRadialSigma). O conjunto ideal de covariáveis foram usados para treinamento do modelo final de cara algoritmo.

O treinamento foi feito através do conjunto ideal gerado pelo RFE: O treinamento utilizou a avaliação cruzada repetida com 10 folds e 10 repetições para otimização do algoritmo e seleção dos melhores hiperparâmetros. Foram testados 5 valores de cada um dos hiperparâmetros de cada modelo durante o treinamento. O resultado do treinamento para cada algoritmo foi usado para o cálculo dos parâmetros de performance das amostras de teste e predição dos mapas de geoambientes. O desempenho dos modelos foram medidos pelo Cohen’s Kappa – (Kappa) (EQ 2), e acurácia (EQ 2).

O kappa fornece uma medida numérica e retrata o grau de concordância entre o resultado da predição e um valor verdade referencial, sendo usado como base a matriz de confusão (MORALES et al., 2018). O valor de k varia de sem acordo (< 0) a quase perfeito ($0.8 < K \leq 1.0$) (LANDIS e KOCH, 1977) Tabela (3). A acurácia ou o índice de exatidão global calculado, indica a probabilidade das classes estudadas e classificadas, corresponderem aos dados verdadeiros, apresentando também valores variando de 0 a 1, de acordo com os valores de k supracitado.

Tabela 3. Guidelines of Landis and Koch, 1977.

Estatística Kappa	Grau de acordo
< 0	Sem acordo
0 - 0.2	Insignificante
0.2 - 0.4	Mediano
0.4 - 0.6	Moderado
0.6 - 0.8	Substancial
0.8 - 1	Quase perfeito

$$\text{Kappa} = \frac{n \sum_{i=1}^c n_{ii} - \sum_{i=1}^c n_{i+} + n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c n_{i+} + n_{+i}} \quad (2)$$

Onde: K é a estimativa do Kappa; n_{ii} é o valor na linha i e coluna i (concordância observada); n_{i+} é a soma da linha i, e n_{+i} é a soma da coluna i da matriz de confusão (produto das marginais, sendo a concordância esperada); n é o número total de amostras; e C é o número total de classes.

$$\text{Acurácia} = \frac{\sum x_i}{n} \times 100 \quad (3)$$

Onde: Acurácia é a exatidão global, x_i representa o somatório de todos os elementos na diagonal da matriz de confusão e n é igual ao número total de amostras.

O processo de seleção de variáveis no RFE, treinamento e predição dos mapas foram repetido 100 vezes com ambas as amostras, treinamento e validação. Este processo é importante para avaliar a variabilidade da predição, visto que estes subconjuntos devem gerar modelos diferente, resultados diferentes e performances diferentes para cada modelo (KUHNN e JOHNSON, 2013). Os resultados finais das amostras de treinamento e validação foram calculados pela média das 100 repetições para kappa e acurácia, sendo também calculado o coeficiente de variação para os dois parâmetros de performance avaliados, este valor foi usando para avaliar a variação da performance de predição de cada algoritmo.

Os mapas finais foram calculados com os 100 mapas gerados, sendo calculando a moda das 100 rodadas para cada pixel. Para o estudo da incerteza da predição dos mapas foi também gerado o mapa de exatidão dos 100 mapas rodados e o Variety Normalizado (VN). O VN representa o número de classe únicas em cada pixel nas 100 rodadas, normalizado pelo número máximo de classe possíveis (Ex: para o mapa de 5 classe este valor é 5 e para o mapa de 9 classes o valor será 9) (eq.4).

$$\text{Variety Normalizado} = \frac{(\text{variety}-1)}{(CM-1)} * 100 \quad (\text{Eq4})$$

Onde: variety é o valor do número de classe únicas em cada pixel nas 100 rodadas, e o CM é número de classes do mapa.

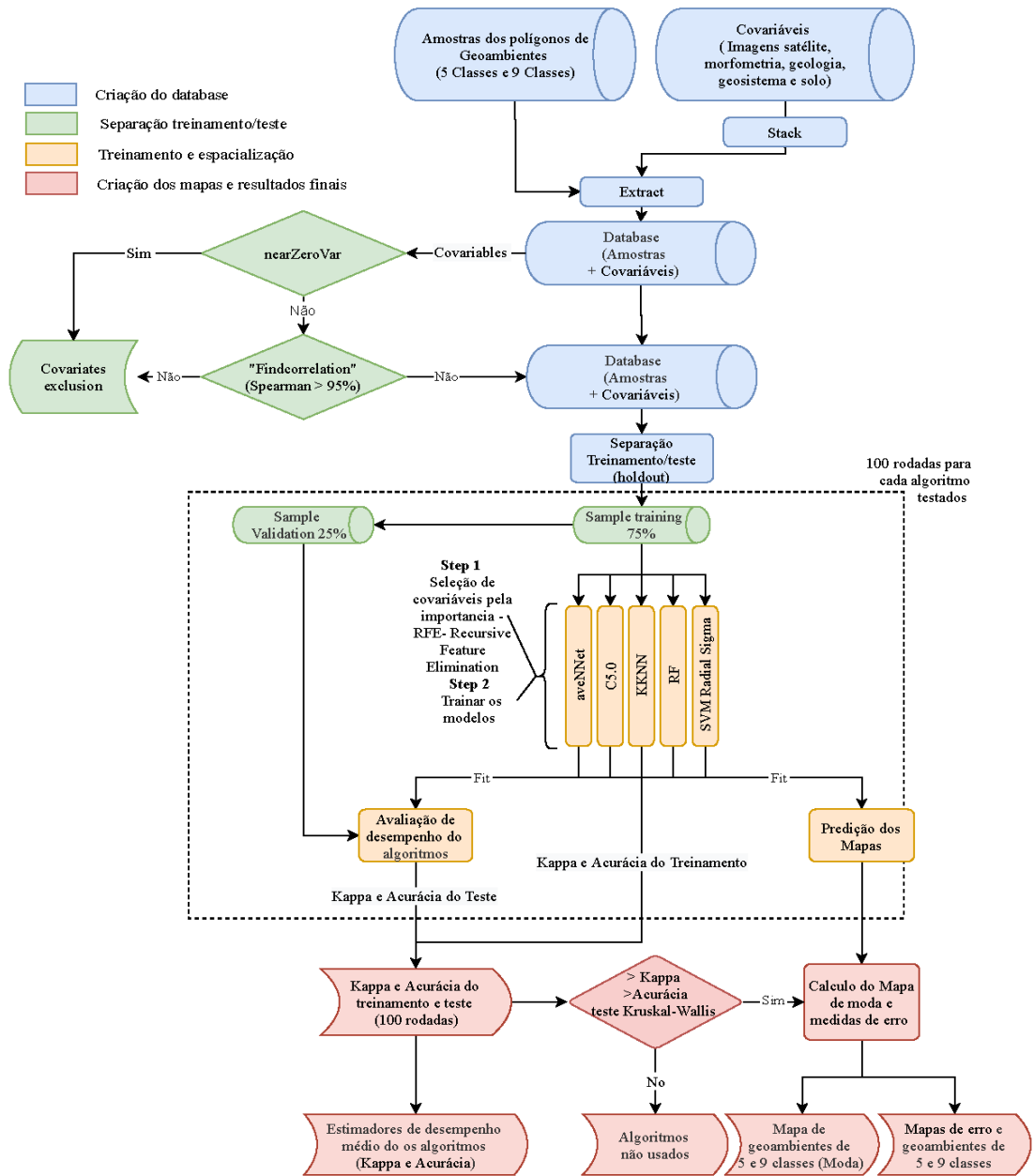
A escolha do melhor algoritmo foi realizada a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. O uso deste teste em vez de testes paramétricos se dá pela não dependência de pressupostos exigidos para análise de variância de FISER, que são a normalidade da variável e a homogeneidade de variâncias entre os tratamentos (MILONE, 2004). Para os elementos que obtiveram diferença estatística significativa entre métodos pelo teste de Kruskal-Wallis, foi realizado o teste posthoc de comparações múltiplas de Dunn (ZAR, 1999). A significância utilizada para todos os elementos nos testes estatísticos foi de 5%.

Toda a metodologia é apresentada de forma ilustrativa no fluxograma da figura 2 abaixo. As análises e gráficos gerados neste trabalho foram desenvolvidos com o software R e suas bibliotecas, sendo estas: ggplot2, hydroGOF, Metrics, PMCMR, rcompanion, multcompView e raster,

2.3. Análise comparativa entre os mapas gerados por modelagem e o mapeamento tradicional dos geoambientes do PARNA-SG

Para fins de comparação entre os mapas gerados pelos modelos e o mapeamento tradicional dos geoambientes, foram utilizados dois mapas produzidos pelo autor na escala de 1: 10.000, um com 5 classes de geoambientes e outro com 9 classes. Foram comparadas as áreas em hectares de cada geoambiente entre os mapas gerados pela modelagem e o mapeamento tradicional. Foram analisado também a distribuição das áreas dos geoambientes geradas pelo mapeamento dos modelos em relação a distribuição dos geoambientes no mapeamento tradicional.

Figura 2. Fluxograma da metodologia testada



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Kappa e Acurácia

A metodologia aplicada para a classificação dos geoambientes do PARNA-SG utilizando modelos de Machine Learning, mostrou melhores resultados de kappa e acurácia quando utilizada para a classificação menos detalhada com 5 classes de geoambientes do que para a classificação com 9 classes. Os resultados comparativos podem ser visualizados nas figuras 3, 4, 5 e 6 e estão descritos a seguir.

Para a classificação de 5 classes de geoambientes, o modelo Random Forest (RF) foi o que apresentou os melhores resultados de kappa entre os demais modelos, com 0,51, seguido pelos modelos svmRadialSigma com 0,48 de kappa e avNNet com 0,46 de kappa. Todos os três modelos se mostraram estatisticamente iguais (Figura 3).

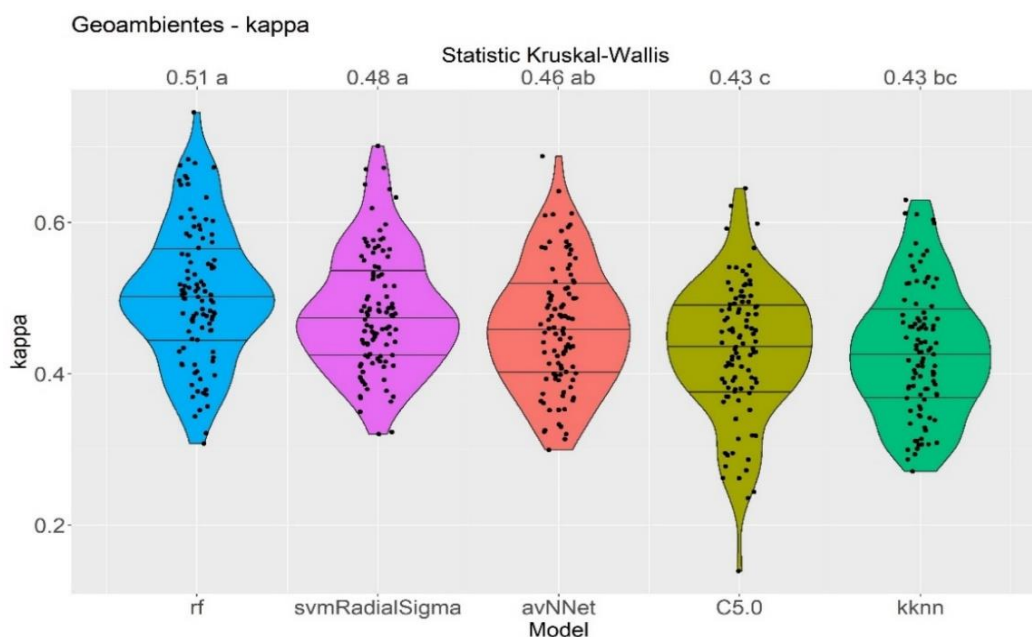


Figura 3. Gráfico dos Kappas para a classificação de 5 classes de geoambientes do PARNA-SG para todos os modelos utilizados.

Os resultados de acurácia, para a classificação de 5 classes de geoambientes seguiu a mesma tendência dos resultados de kappa, sendo o modelo RF o que apresentou o melhor resultado, obtendo o maior valor de acurácia entre os demais modelos com 0,61, seguido pelos modelos svmRadialSigma com 0,59 de acurácia e avNNet com 0,57 de acurácia. Assim como nos resultados de kappa, os três modelos se mostraram estatisticamente iguais (Figura 4).

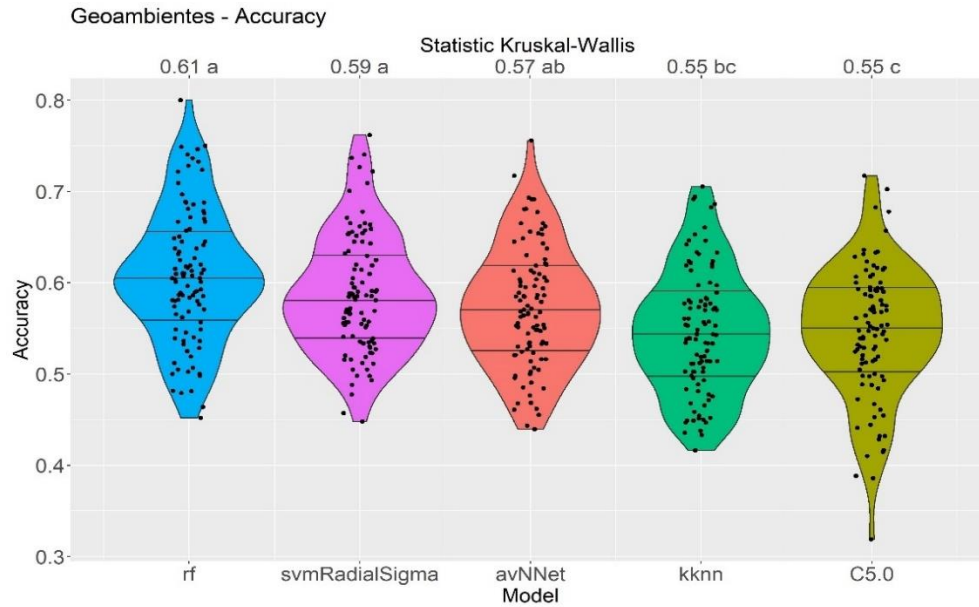


Figura 4. Gráfico da Acurácia para a classificação de 5 classes de geoambientes do PARNA-SG para todos os modelos analisados.

Na classificação de 9 classes de geoambientes, o modelo RF também foi o que apresentou a melhor performance, obtendo o maior valor de kappa entre os demais modelos, com 0,44 de kappa, seguido pelos modelos C5.0 com 0,39 de kappa e avNNNet, com 0,38 de kappa. O modelo RF se mostrou estatisticamente diferente dos demais modelos, enquanto os modelos C5.0 e avNNNet foram estatisticamente iguais (figura 5).

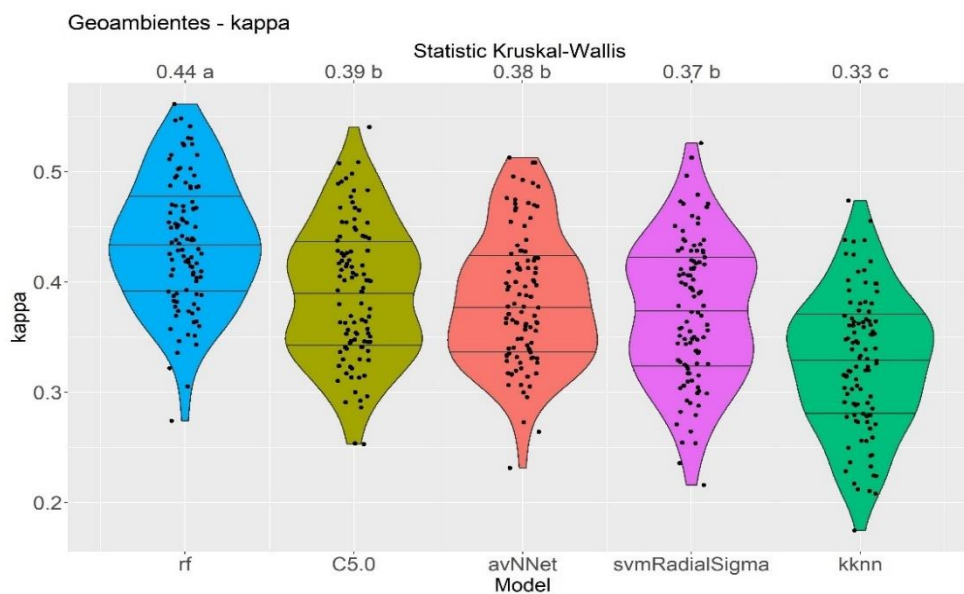


Figura 5. Gráfico dos Kappas para a classificação de 9 classes de geoambientes do PARNA-SG para cada um dos 5 modelos utilizados.

Para classificação de 9 classes de geoambientes os resultados de acurácia também seguiram as mesmas tendências dos valores de kappa, sendo o modelo RF o que apresentou o melhor resultado de acurácia entre os demais modelos, com 0,5 de acurácia, seguido pelos modelos C5.0 com 0,46 de acurácia e avNNNet, com 0,45 de acurácia. O modelo RF se mostrou estatisticamente diferente dos demais modelos, enquanto os modelos C5.0 e avNNNet foram estaticamente iguais (figura 6).

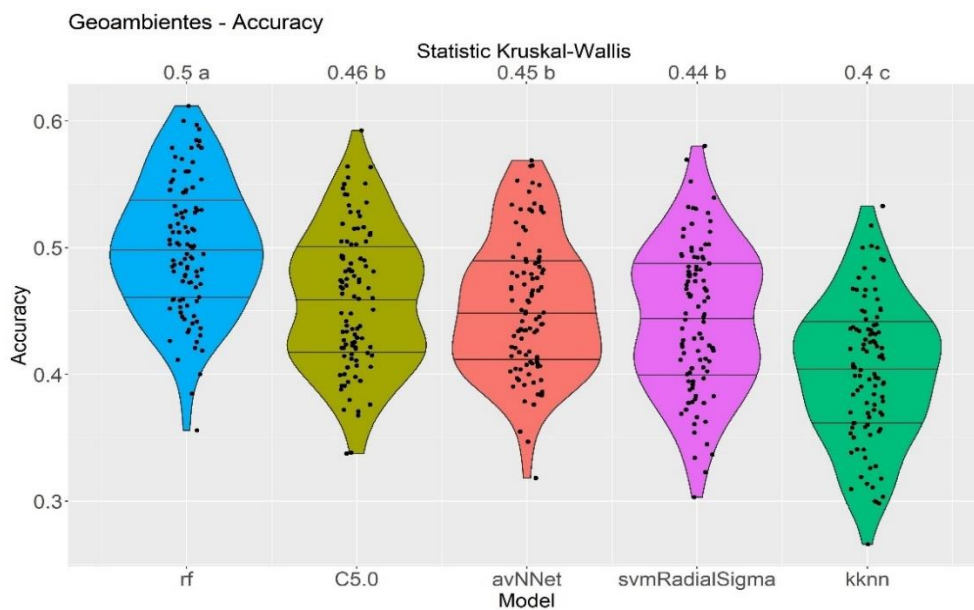


Figura – 6 – Gráfico da acuracia para classificação de 9 classes de geoambientes do PARNA-SG para cada um dos 5 modelos utilizados.

3.2. Análise de importância das variáveis

3.2.1. Classificação de cinco geoambientes

As figuras 7 e 8 mostram as covariáveis de maior importância para os três modelos com os melhores desempenhos estatísticos na classificação de 5 (cinco) classes de geoambientes do PARNA-SG (RF, svmRadialSigma e avNNNet) e 9 (nove) (RF, C5.0 e avNNNet). A importância das covariáveis mostra como cada uma utilizada colaboraram de forma efetiva para a predição em cada modelo.

Os modelos svmRadialSigma e avNNet apresentaram praticamente as mesmas covariáveis como a mesma ordem de importância, a única diferença foi que o modelo avNNet apresenta oito covariáveis a mais do que o modelo svmRadialSigma, sendo todas as oito covariáveis de menor importância. As principais variáveis para ambos os modelos foram band_2_chuva, band_4_chuva, ndvi_chuva, band_3_seco, band_3_chuva e ndvi_seco (figura 7).

O modelo RF apresentou como principais covariáveis uma série em nível de importância bastante similar aos modelos supracitados, com band_4_chuva, band_2_chuva, band_3_chuva, band_3_seco, ndvi_seco e MDE (figura 7). Esse resultado mostra que as covariáveis mais importantes para os modelos aqui avaliados, quando aplicadas a classificação de geoambientes, de forma geral, foram as covariáveis espectrais (Imagem de Satélite) e em sua maioria no período chuvoso, sendo a única exceção neste grupo principal de covariáveis o MDE do modelo RF, que é uma covariável morfometria/topográfica. O MDE se mostrou um pouco menos importante nos modelos svmRadialSigma e avNNet, mas se manteve entre as variáveis mais importantes para ambos também (figura 7).

Logo em seguida, nota-se um domínio de covariáveis morfométricas/topográficas (figura 7), tanto no modelo RF (solard_diffuse2, solard_ration1, ndvi_chuva, terrain_surface_texture, standardized_height e solard_total1) quanto nos modelos svmRadialSigma e avNNet (solard_ration1, MDE, solard_total1, standardized_height, valley_depth e mrrtf).

A delimitação dos geoambientes depende da estratificação integrada do meio físico em função da geologia, do relevo e tipo de solo, em associação com as fitofisionomias. A paisagem do PARNA-SG forma um grande mosaico, com formações vegetais diversas, que variam desde Campos Rupestres sobre extensos afloramentos de rochas ou canga, até formações florestais densas que transitam entre as formações campestres e savânicas do Cerrado, proporcionando uma grande diversidade de padrões, passíveis de serem reconhecidos por imagens de sensores remotos. Apesar da importância dos atributos do meio físico durante o mapeamento tradicional de geoambientes, os resultados mostraram que as covariáveis espectrais foram mais importantes no mapeamento digital, indicando que os padrões de imagem gerado pelo mosaico da paisagem do parque foi mais importante nas predições dos modelos do que as covariáveis morfométricas/topográficas, relacionadas de alguma forma com as características dos solos, da geologia e geomorfologia.

3.2.2. Classificação de nove geoambientes

O modelo RF apresentou como principais covariáveis: band_4_seco, MDE, band_2_chuva, band_4_chuva, solrad_diffuse2, standardized_height, band_3_seco e band_3_chuva (figura 8). Esse resultado mostra que diferentemente dos resultados obtidos na classificação de 5 classes de geoambientes, quando as principais covariáveis foram espectrais, neste caso, nota-se uma combinação de covariáveis morfométricas e espectrais. Abaixo destas covariáveis principais percebe-se que houve o predomínio das covariáveis morfométricas: terrain_surface_texture, NDVI_seco, solrad_ration1, terrain_surface_convexity, slope_Height, NDVI_chuva, easternness, wti1, etc (figura 8).

O modelo C5.0 distribuiu de forma bastante homogênea a importância das principais covariáveis para este modelo (figura 8). As três covariáveis mais importantes foram covariáveis espectrais, porém, a partir deste ponto houve o predomínio das variáveis morfométricas: MDE, solrad_diffuse2, terrain_surface_texture, solrad_direct1, terrain_surface_convexity, solrad_sunrise2, slope_Height, NDVI_chuva, etc (figura 8).

O modelo avNNet assim como o modelo RF, suas covariáveis de maior importância formam uma combinação de covariáveis morfométricas e espectrais (band_4_seco, slope, mrrtf, slorad_dur1, band_4_chuva, wti1, band_2_chuva, NDVI_seco, solrad_diffuse2, NDVI_chuva, etc. Mais abaixo em nível de importância das covariáveis, percebe-se também a mesma tendência do modelo RF, ocorre também o predomínio das covariáveis morfométricas: solrad_direct1, slope_Height, solrad_sunset2, ban_3_seco, band_3_chuva, terrain_surface_texture, solrad_sunset1, solrad_dur2, standardized_height, solrad_sunrise1, MDE, etc (figura 8). É possível notar que a covariável MDE teve maior importância nas previsões do modelo avNNet quando classificando 5 classes de geoambientes, do que neste caso com 9 classes.

Diferentemente do que ocorreu na análise de importância das principais covariáveis da classificação para 5 classes de geoambientes, onde covariáveis espectrais dominaram, na classificação para 9 classes notou-se que a combinação entre covariáveis morfométricas e espectrais foram as principais determinantes para os modelos analisados. Em seguida, nota-se um predomínio das covariáveis morfométricas sobre as espectrais também de uma forma geral para todos os modelos analisados neste caso.

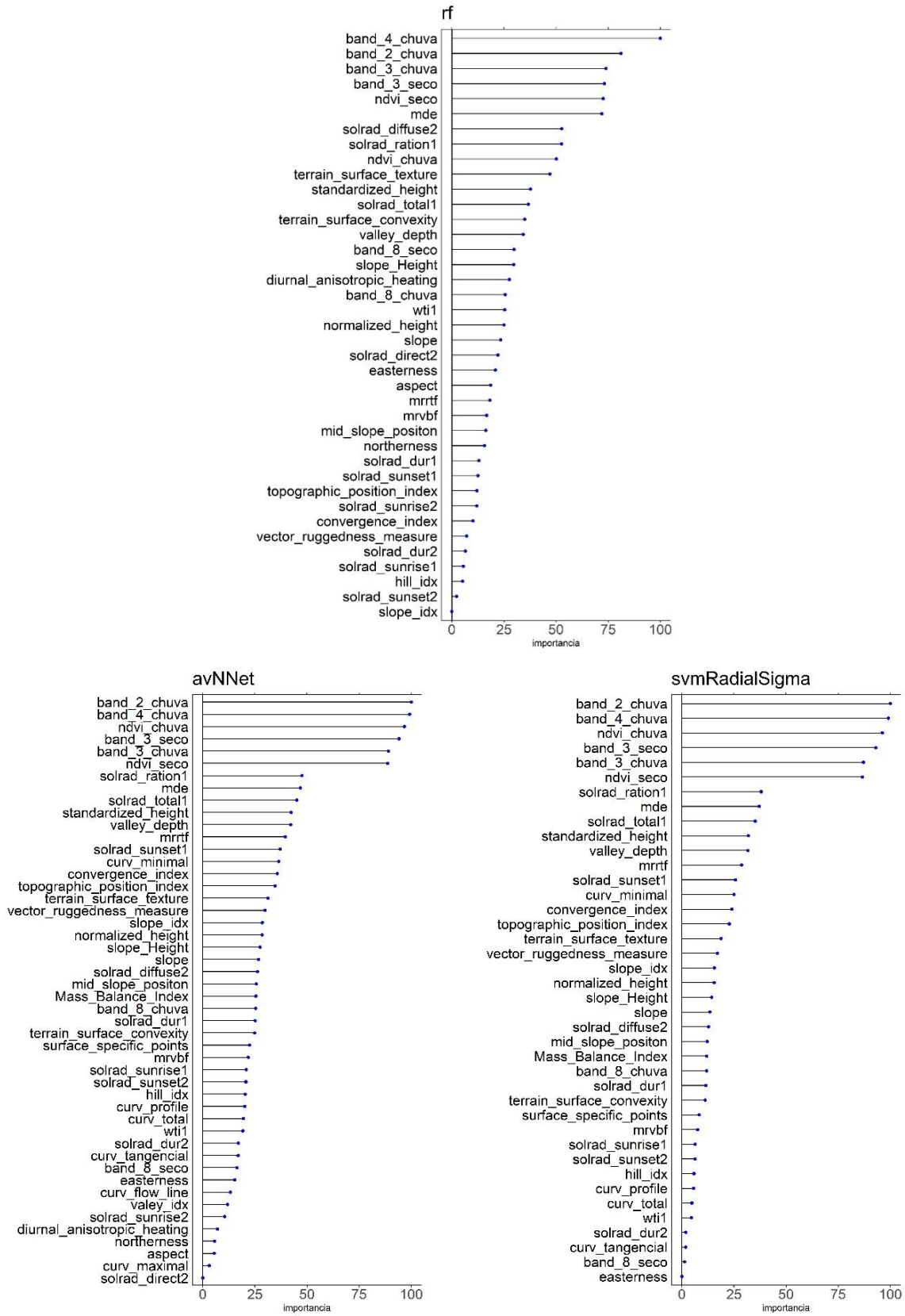


Figura 7. Gráficos de importância das variáveis para os modelos RF, svmRadialSigma e avNNet na classificação de 5 classes de geoambientes.

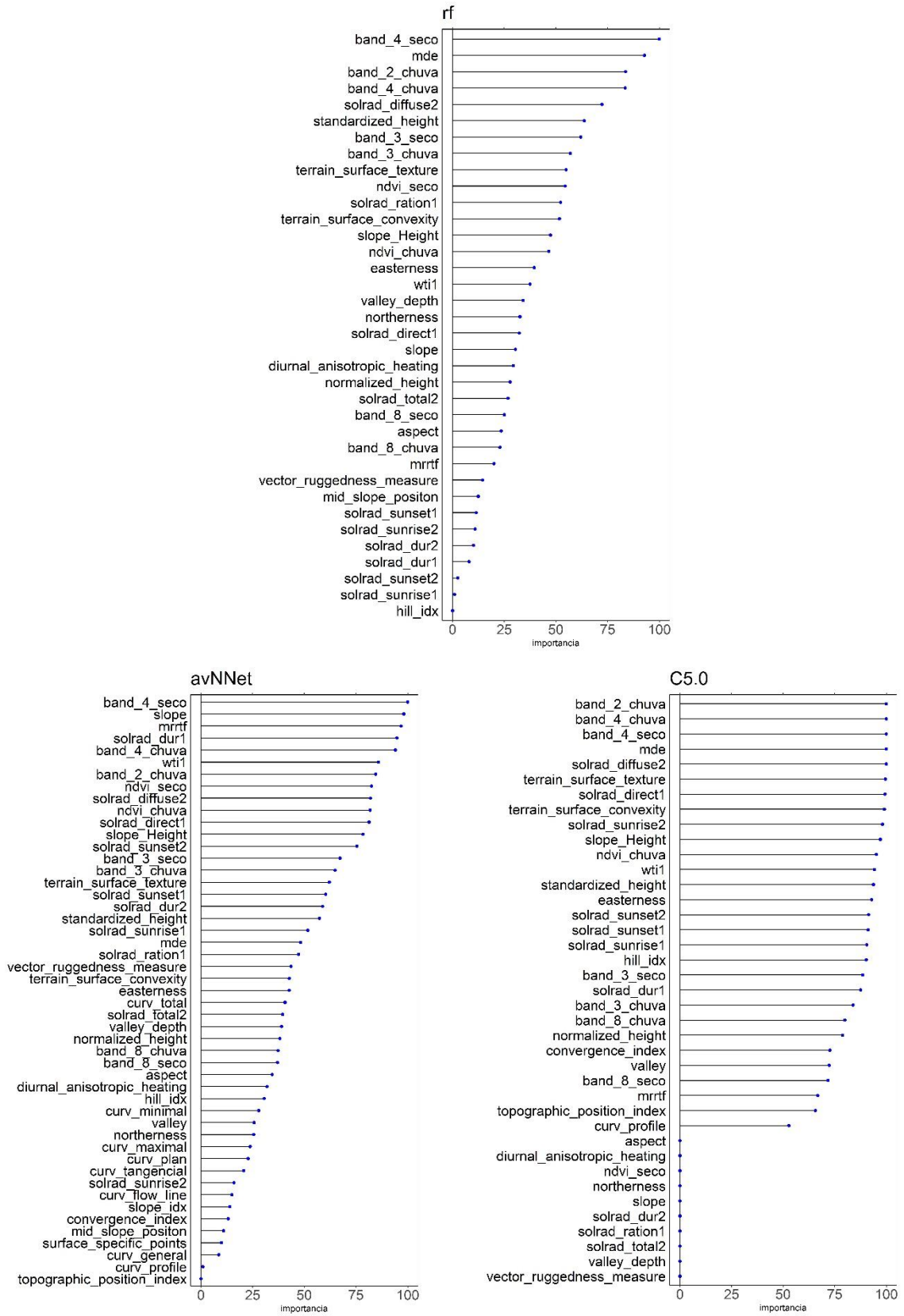


Figura 8. Gráficos de importância das variáveis para os modelos RF, C5.0 e avNNet na classificação de 9 classes de geoambientes.

3.3. Análise comparativa entre os mapas gerados por modelagem e o mapeamento tradicional dos geoambientes do PARNA-SG

Para a realização da análise comparativa foram escolhidos os três modelos de melhor desempenho estatístico para a classificação de 5 (RF, svmRadialSigma e avNNet) e 9 (RF, C5.0 e avNNet) classes de geoambientes.

3.3.1. Modelagem para 5 classes de geoambientes

O modelo RF, foi o que apresentou os maiores valores de kappa e acurácia entre os demais modelos, a análise comparativa entre o mapa gerado pelo modelo RF e o mapeamento tradicional dos geoambientes do PARNA-SG (figuras 9 e 11, e tabela 4), mostrou que este modelo foi o que mais subestimou o geoambiente Capão Alto/Baixo, mas conseguiu distribuir de forma coerente as áreas classificadas como tal. O modelo RF, superestimou a Área antropizada, o Cerrado stricto sensu/Rupestre, e o Campo Limpo/Sujo. Estas as áreas superestimadas como os geoambientes citados, ocuparam áreas onde prevalecem outras classes, causando erros na distribuição destes geoambientes, que ocuparam principalmente as áreas do Capão Alto/Baixo, do Campo Rupestre aberto e arbustivo. O Campo Rupestre Aberto/Arbustivo obteve uma área praticamente igual à do mapeamento tradicional, porém, com distribuição mais fragmentada, tendo suas áreas substituídas em diversas regiões principalmente pela Área antropizada e pelo Campo Limpo/Sujo (figura 11).

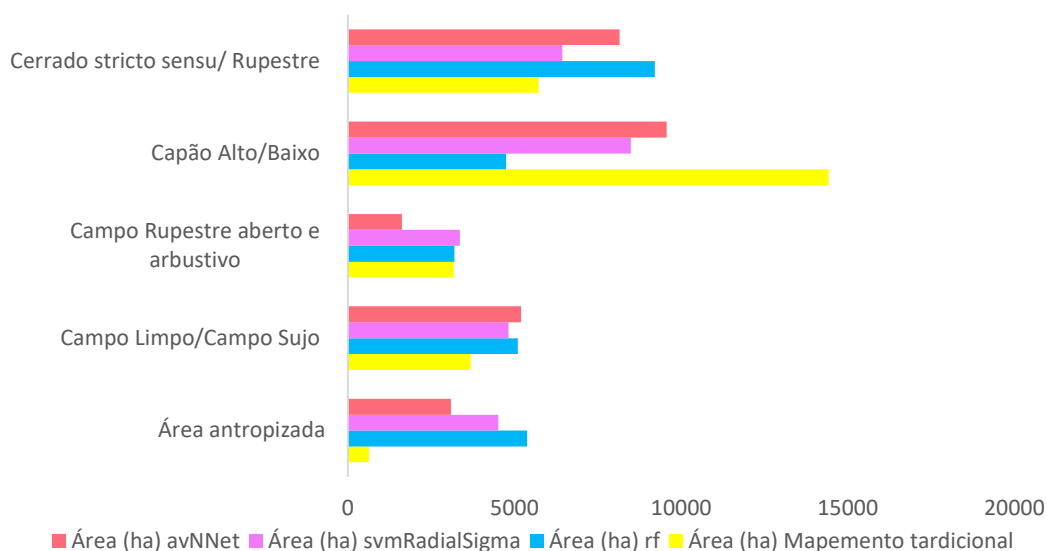


Figura 9. Gráfico das áreas em hectares de todos os geoelementos do PARNA-SG para cada um dos 3 mapas gerados pelos modelos selecionados e para o mapeamento tradicional (5 classes de geoelementos).

O modelo svmRadialSigma obteve estatisticamente o segundo melhor desempenho entre os três modelos aqui analisados. Este modelo também superestimou a Área antropizada, que ficou distribuída de forma generalizada sobre as áreas dos demais geoelementos (figura 9 e 11). O Capão Alto/Baixo foi menos subestimado quando comparado com o modelo RF, e apesar de fragmentada, apresentou uma distribuição também coerente destas áreas florestadas. O Capão Alto/Baixo teve parte de sua área substituída principalmente pelos geoelementos: Área antropizada, Cerrado stricto sensu/Rupestre e Campo Limpo/Sujo (figuras 9 e 11, e tabela 4). Estes dois últimos geoelementos também foram superestimados por esse modelo, porém, apesar de terem avançado sobre a área de outros geoelementos, eles dominaram o setor oeste do PARNA-SG, assim como encontrado no mapeamento tradicional dos geoelementos (figura 11). O Campo Rupestre aberto/arbustivo, apesar de ter sua área superestimada, apresentou boa distribuição, sendo substituído principalmente pela Área antropizada e pelo Campo Limpo/Sujo (figuras 9 e 11).

Tabela – 4 - Área em hectares dos geoambiente do PARNA-SG para cada um dos 3 modelos selecionado e para o mapeamento tradicional.

Geoambiente	Área (ha)			
	Mapeamento tradicional	RF	svmRadialSigma	avNNNet
Área antropizada	630,04	5379,21	4515,12	3095,82
Campo Limpo/Campo Sujo	3687,60	5101,65	4819,68	5193,45
Campo Rupestre aberto e arbustivo	3182,61	3203,19	3358,08	1621,17
Capão Alto/Baixo	14429,05	4743,27	8495,82	9565,38
Cerrado stricto sensu/ Rupestre	5726,96	9210,06	6439,95	8152,56

O modelo avNNNet apesar de ter classificado aproximadamente cinco vezes mais áreas como Área antropizada, foi também o modelo que menos superestimou este geoambiente. Assim como o modelo svmRadialSigma, distribuiu a Área antropizada de forma generalizada sobre os demais geoambientes. O modelo avNNNet foi o que menos subestimou as áreas de Capão Alto/Baixo, e apresentou uma distribuição bastante coerente destas áreas (figuras 9 e 11, e tabela 4). O Cerrado stricto sensu/Rupestre e o Campo Limpo/Campo foram superestimados, semelhantemente ao modelo svmRadialSigma, mas revelou ocorrência predominante no setor oeste do PARNA-SG.

De forma geral, a comparação dos mapeamentos gerados pelos modelos e o mapeamento tradicional dos geoambientes do PARNA-SG mostrou que o modelo RF, mesmo apresentado os melhores resultados de kappa e acurácia, foi inferior em termos de quantificação e distribuição dos ambientes quando comparado com o modelo svmRadialSigma, que apresentou um mapeamento mais representativo em comparação com o mapeamento tradicional dos geoambientes (figura 11).

3.4. Análise do Variety Normalizado (VN)

A análise do VN permite entender quais os pixels que assumiram mais ou menos diferentes classificações durante as 100 rodadas, ou seja, com o mapa do VN e possível visualizar onde as predições das classes para cada pixels sofreram as maiores variações, sendo assim, quanto maior o valor da porcentagem do VN, pior a predição do modelo para aquele pixel. Nas figuras 10 e 13 podem ser analisados os mapas do VN para os modelos RF,

svmRadialSigma, C5.0 e avNNet usados nas análises da classificação de 5 e 9 geoambientes. Os valores foram distribuídos em três classes de VN: baixo (0 a 33%), médio (36 a 67%) e alto (68 a 100%).

3.4.1. Variety Normalizado (VN) para classificação de 5 classes de geoambientes

A análise do VN para o modelo RF mostrou um predomínio das classes baixa e média de de VN como um todo para o mapeamento. O modelo concentrou as áreas de alto VN principalmente nas regiões relacionadas as áreas dos geoambientes florestados, corroborando com a análise comparativa entre o mapeamento tradicional dos geoambientes e o mapeamento gerado pelo modelo RF, que subestimou os geoambientes florestados, e tiveram parte de suas áreas substituídas por outros geoambientes. As áreas de baixo VN, concentraram-se principalmente nas áreas relacionadas ao geoambiente Cerrado stricto sensu/Rupestre, outras áreas de baixo VN aparecem dispersas de forma generalizada e fragmentada por toda área de estudo. As áreas com médio VN, de forma geral, ficaram distribuídas de maneira generalizada por toda a área do parque, com uma pequena concentração nas áreas relacionadas principalmente ao geoambiente Campo Rupestre Aberto/Arbustivo (figura 10).

A análise do NV para o modelo svmRadialSigma, mostrou um predomínio das classes baixa e média sobre a classe alta no mapeamento do NV como um todo. O modelo concentrou as regiões de alto VN nos setores centro-sudeste e sudeste do parque, essas áreas estão relacionadas principalmente com geoambientes florestados e Campos Rupestres. Nos setores oeste e noroeste do PARNA-SG, as áreas de alto NV aparecem de forma fragmentada e aparentemente sem relação específica com nenhum geoambiente analisado. As áreas de baixo VN se concentraram principalmente na região central do parque, relacionadas principalmente ao geoambiente Capão Alto/Baixo, presente na depressão do Gandarela, e também no setor norte do parque, nas áreas de florestas, presentes nas linhas de drenagem que cortam os geoambientes do Cerrado. As áreas de médio VN apareceram principalmente de forma fragmentada, mas com uma pequena concentração desta classe nas áreas relacionadas aos Campos Rupestres Abeto/arbustivo no setor central e no setor sudeste (figura 10).

A análise do VN para o modelo avNNNet mostrou que houve o predomínio das Classes Alta e Média sobre a classe Baixa no mapa do VN gerado. As regiões de alta VN se concentraram desde o setor central e se estendem até o setor sudeste do parque, cobrindo uma área relacionada principalmente aos geoambientes florestados e aos Campos Rupestres. As áreas de baixo VN ocorreram principalmente de forma generalizada e fragmentada por todo o parque, as poucas regiões onde estas áreas de baixo VN se concentram, têm relação com as florestas da região central e o geoambiente Cerrado stricto sensu/Rupestre no setor norte. As áreas de médio VN ficaram distribuídas de forma fragmentada e generalizada por toda área de estudo, e sem relações específicas com os geoambientes analisados (figura 10).

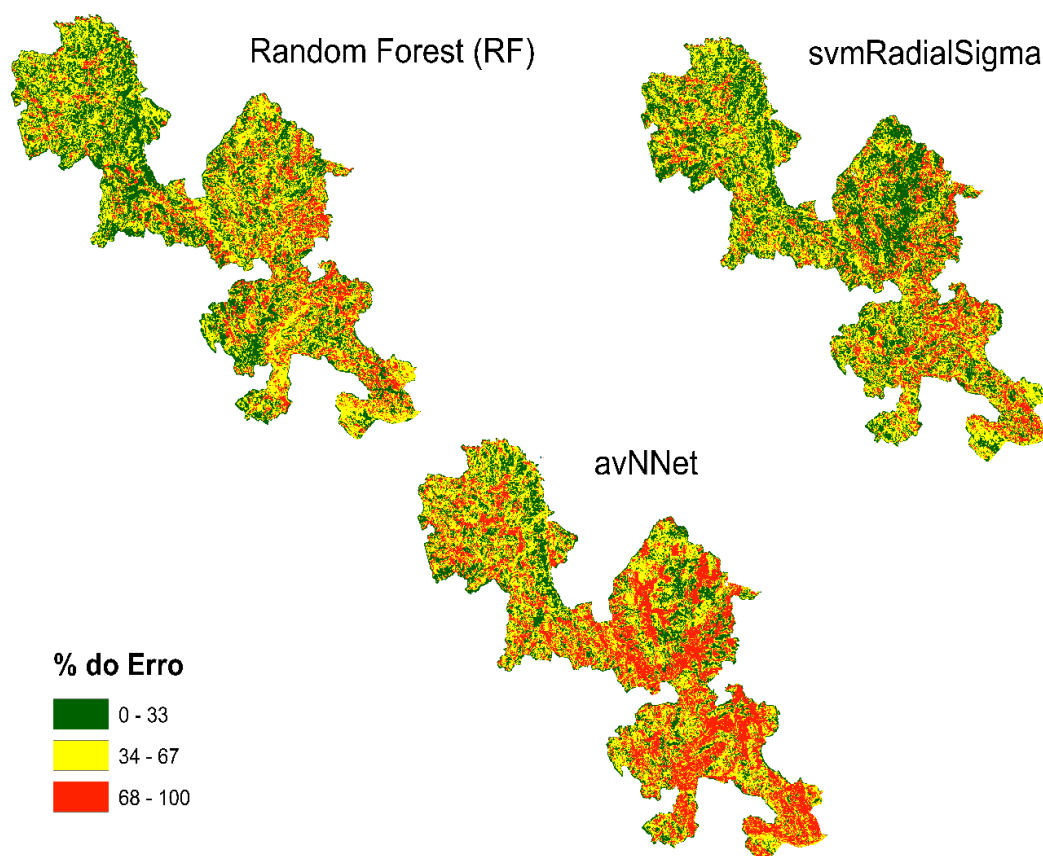


Figura 10. Mapas do Variety Normalizado (VN) para 5 classes de geoambientes do PARNASG, gerado pelos modelos Random Forest (RF), svmRadialSigma e avNNNet.

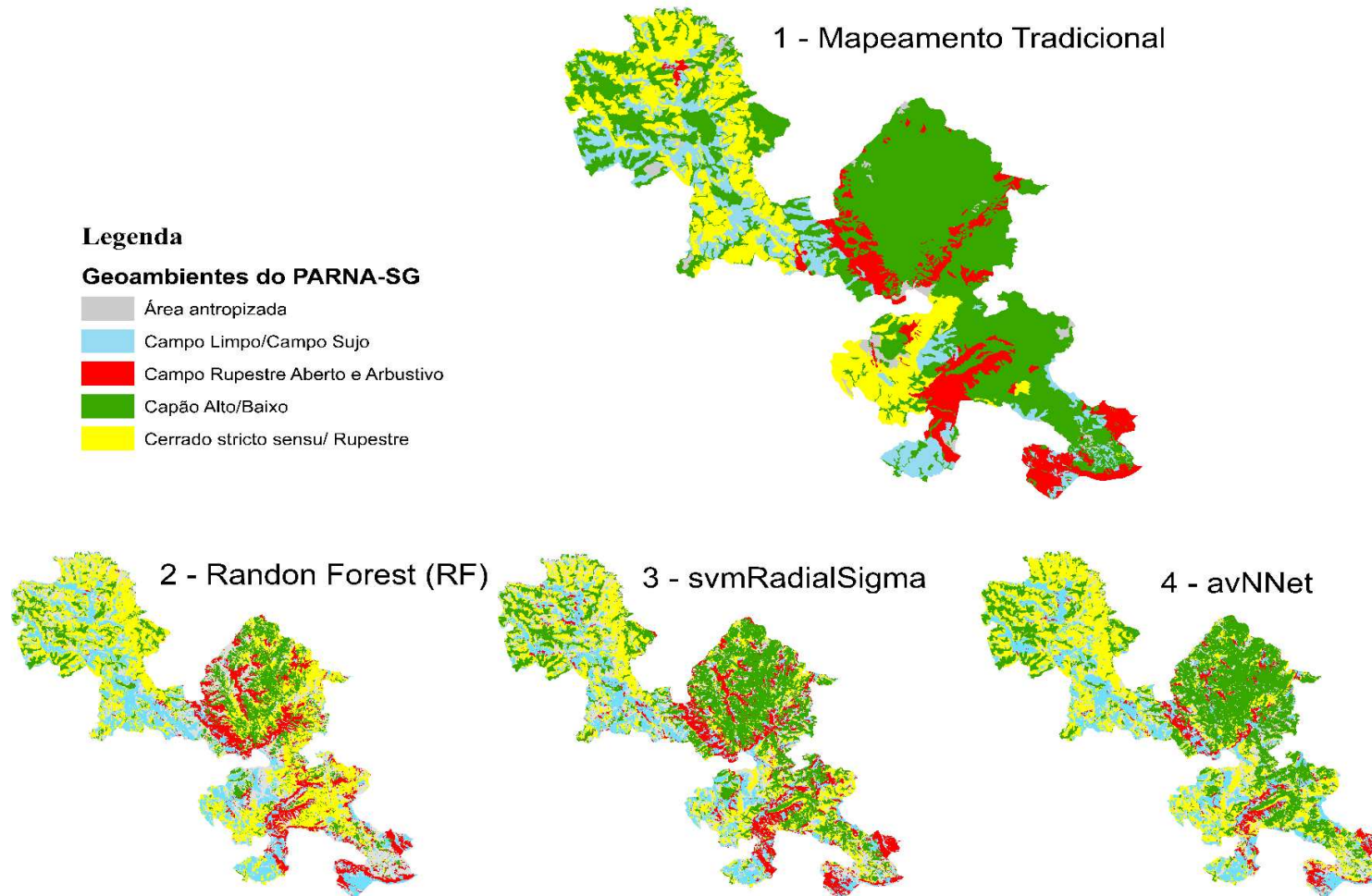


Figura 11. Imagem 1, mapeamento tradicional para 5 classes de geoambientes do PARNA-SG para fins comparativos com os mapas gerados pelos modelos nas imagens 2 (RF), 3 (svmRadialSigma) e 4 (avNNNet).

3.4.2. Modelagem para 9 classes de geoambientes

O modelo RF, assim como na classificação para 5 classes de geoambientes, foi o modelo que apresentou os maiores valores de kappa e acurácia entre os demais modelos. A análise comparativa entre o mapa gerado pelo o modelo RF e o mapeamento tradicional dos geoambientes do PARNA-SG (figuras 12 e 14, e tabela 5), mostrou que este modelo subestimou ambos os geoambientes florestados, mas subestimou menos Capão Alto em relação ao Capão Baixo, apesar do modelo ter se confundido na classificação destes dois geoambientes, ele foi capaz de distribuiu de forma coerente estas áreas florestadas. O modelo RF superestimou a Área antropizada, o Campo Limpo e o Campo Sujo, que sobrepueram principalmente as áreas do Cerrado Strictu Sensu, que por sua vez, teve a área subestimada (figuras 12 e tabela 5). O Cerrado Rupestre obteve uma área praticamente igual à do mapeamento tradicional, porém, este modelo não apresentou uma boa distribuição das áreas deste geoambiente. O Campo Rupestre Aberto foi pouco subestimado pelo modelo, mas apresentou uma distribuição bastante coerente com o mapeamento tradicional, já o Campo Rupestre Arbustivo foi muito superestimado, e avançou principalmente sobre as áreas dos geoambientes florestados na parte central do PARNA-SG e no setor sudeste.

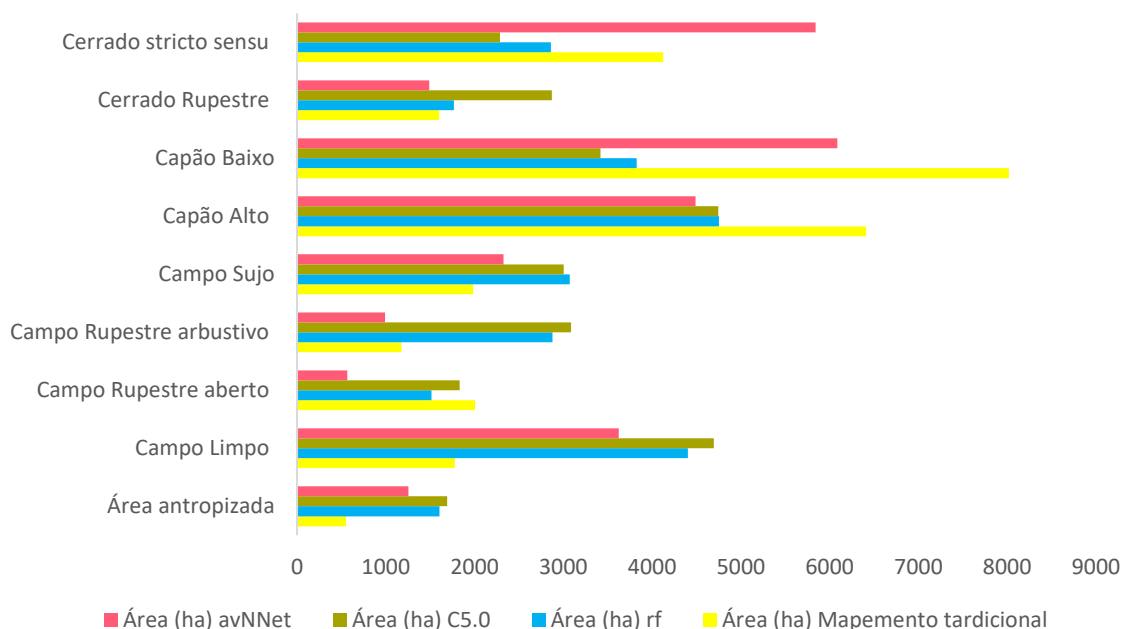


Figura 12. Gráfico das áreas em hectares de todos os geoambientes do PARNA-SG para cada um dos 3 mapas gerados pelos modelos selecionado e para o mapeamento tradicional (9 classes de geoambientes).

O modelo C5.0 obteve estatisticamente o segundo melhor desempenho entre os três modelos aqui analisados. Este modelo foi o que mais superestimou a Área antropizada, que ficou distribuída de forma aleatória, avançando sobre as áreas dos demais geoambientes. Os geoambientes florestados Capão Alto e Capão Baixo foram subestimados, mas estão distribuídas de forma consideravelmente adequada. Estes geoambientes florestados tiveram parte de suas áreas sobrepostas principalmente pelo Campo Rupestre Arbustivo, pelo Cerrado Rupestre pelo Campo Limpo e pela Área antropizada. O modelo C5.0 apresentou uma performance semelhante para os geoambientes Campo Limpo e Campo sujo, tanto em área superestimada quanto para a distribuição. C5,0 foi o modelo que mais superestimou o Cerrado Rupestre, obtendo uma distribuição equivocada ocupando áreas indevidas, que deveriam estar classificadas como outras classes de geoambientes, principalmente os florestados (figuras 12 e 14, e tabela 5). O modelo C5.0 foi o modelo que mais subestimou o Cerrado stricto sensu que teve sua área substituída principalmente pelos outros geoambientes da formação cerrado como Campo Limpo, Campo Sujo e Cerrado Rupestre (figuras 12 e 14). O Campo Rupestre Aberto apesar de um pouco subestimado, apresentou uma distribuição bastante satisfatória comparativamente com o mapeamento tradicional. Este foi o modelo que mais superestimou o Campo Rupestre Arbustivo, que assim como no modelo RF, não apresentou uma boa distribuição deste geoambiente (figuras 12 e 14, e tabela 5).

Tabela 5 - Área em hectares dos geoambiente do PARNA-SG para cada um dos 3 modelos selecionado e para o mapeamento tradicional.

Geoambiente	Área (ha)			
	Mapeamento tradicional	RF	C5.0	avNNet
Área antropizada	552,09	1604,43	1692,36	1256,58
Campo Limpo	1779,23	4402,08	4694,22	3624,84
Campo Rupestre aberto	2006,42	1514,07	1833,48	567,18
Campo Rupestre arbustivo	1176,20	2879,28	3085,92	992,25
Campo Sujo	1984,16	3073,23	3006,09	2325,51
Capão Alto	6410,94	4752,54	4745,97	4490,55
Capão Baixo	8020,28	3827,88	3418,83	6086,61
Cerrado Rupestre	1602,44	1768,41	2871,09	1490,22
Cerrado stricto sensu	4124,51	2859,66	2287,98	5842,35

O modelo avNNet foi o que menos superestimou a Área antropizada, e assim como o modelo C5.0, o modelo avNNet distribuiu este geoambiente de forma generalizada e aleatoriamente sobre as áreas dos demais geoambientes (figuras 12 e 14, e tabela 5). O modelo avNNet apesar de subestimar os geoambientes florestados como os demais modelos, foi o modelo que mais se aproximou em área do Capão Baixo quando comparado com o mapeamento tradicional, este modelo teve dificuldades para distribuir e distinguir o Capão Baixo do Capão Alto (figuras 12 e 14, e tabela 5). O modelo avNNet foi o que menos superestimou o Campo Limpo, que teve uma distribuição equivocada, mesmo que permanecendo no setor oeste do parque, como apontou o mapeamento tradicional dos geoambientes (figura 14) para todas as formações do Cerrado. Este modelo foi o que menos superestimou o Campo Sujo, que apresentou uma distribuição muito fragmentada apesar de ter distribuído boa parte destas áreas sobre os locais mapeados tradicionalmente como tal. O modelo avNNet foi o único que superestimou o Cerrado stricto sensu, que avançou principalmente sobre os geoambientes florestados e os Campos Rupestres Aberto e Arbustivo. Para o Cerrado Rupestre, o modelo obteve uma área praticamente igual à do mapeamento tradicional, porém, distribuída de forma fragmentada. Ambos os Campos Rupestres Aberto e Arbustivo foram subestimados e tiveram parte de suas áreas substituídas por outros geoambientes (figuras 12 e 14, e tabela 5).

3.4.3. Variety Normalizado (VN) para classificação de 9 classes de geoambientes

No mapa do VN para o modelo RF, houve claramente o predomínio das áreas de baixo VN sobre as áreas das demais classes, estas áreas de baixo VN ficaram distribuídas por toda a área de estudo principalmente de forma concentrada, mas com algumas fragmentações entre essas áreas de concentração. As áreas de médio VN apareceram de forma fragmentada e dispersa, sem nenhuma relação específica aparente com os geoambientes analisados. Já as áreas de alto VN apareceram de forma muito reduzida e também sem relação com os geoambientes analisados (figura 13).

No mapa do VN para o modelo C5.0, houve claramente o predomínio das áreas de médio VN sobre as áreas das demais classes, estas áreas se apresentaram principalmente de forma concentrada com pouquíssimas fragmentações, e distribuídas por toda a área de estudo. As áreas

de alto VN não foram tão reduzidas como no modelo RF, mas também foram pouco representativas, fragmentadas e sem relações específicas com os geoambientes analisados (figura 13).

A análise do VN para o modelo avNNet mostrou que, assim como para o modelo C5.0 houve o predomínio das áreas de médio VN sobre as áreas das demais classes. O modelo avNNet distribuiu as áreas de médio VN generalizadamente por toda área de estudo, principalmente de forma concentrada e com poucas fragmentações. As áreas de baixo VN ficaram distribuídas principalmente de forma fragmentada, mas com algumas concentrações na região central e no setor sudeste do parque, mas sem relações específicas com as áreas dos geoambientes analisados. Este foi o modelo que aparentou a maior área de alto VN. Parte destas áreas que de forma geral ficaram fragmentadas, formam pequenas concentrações no centro e no setor sul do parque, relacionadas principalmente as áreas dos Campos Rupestres (figura 13).

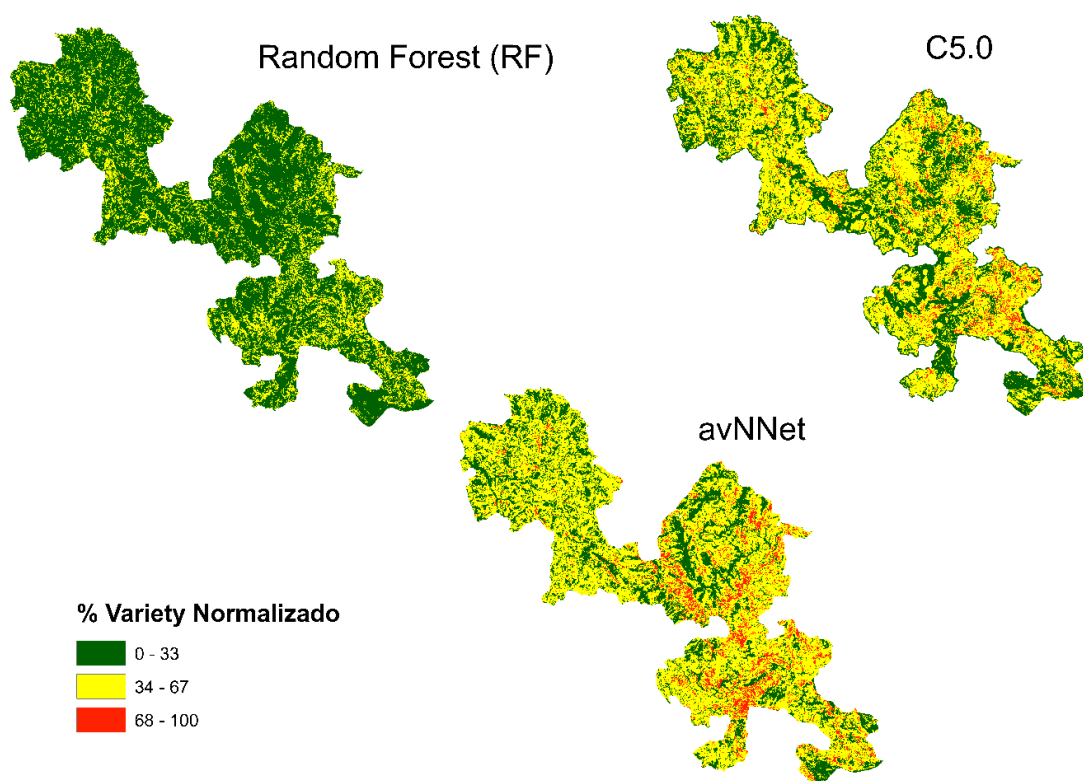


Figura 13. Mapas do Variety Normalizado para 9 classes de geoambientes do PARNA-SG, gerado pelos modelos Random Forest (RF), C5.0 e avNNet.

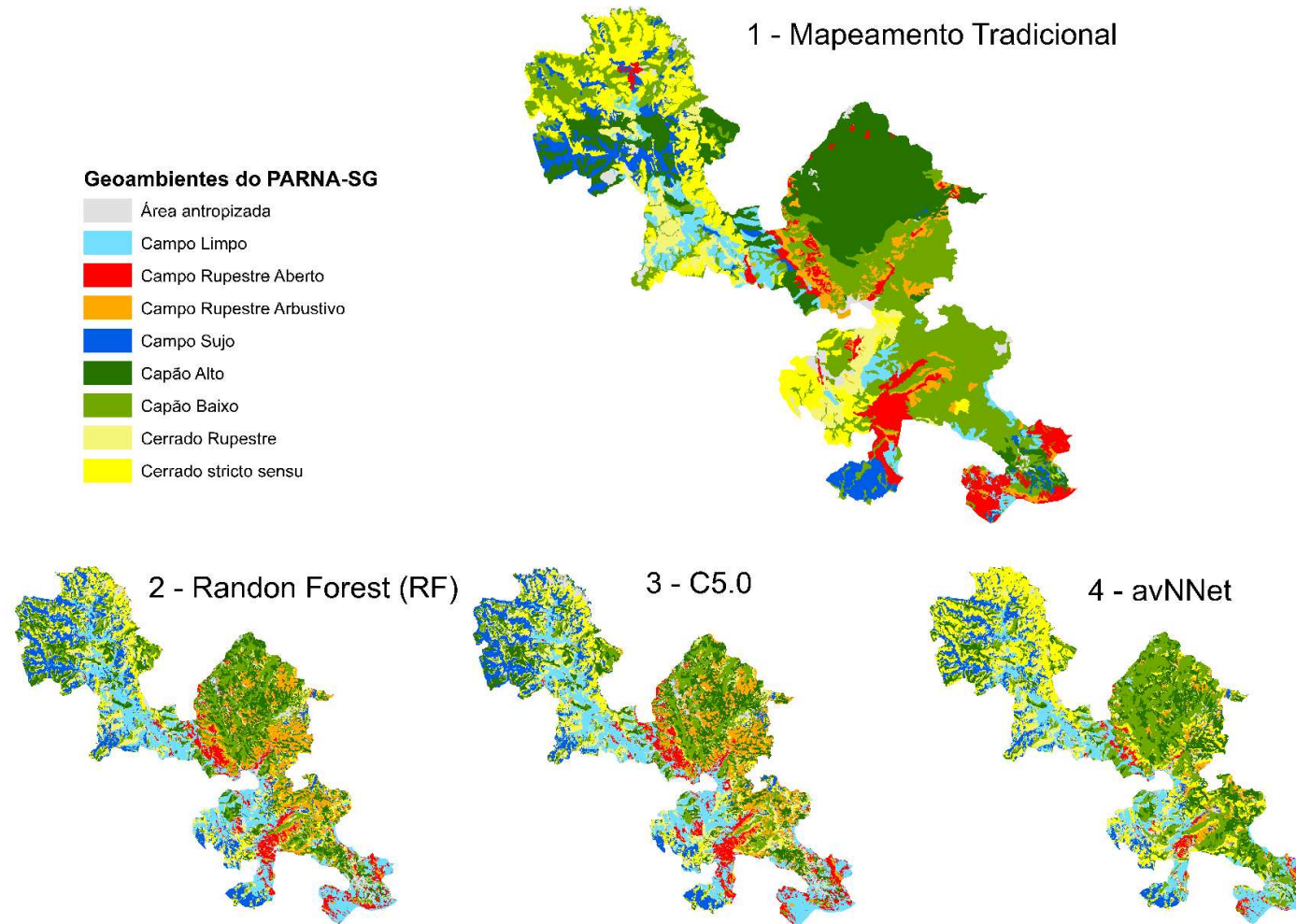


Figura 14. Imagem 1 – Mapeamento tradicional para 9 classes de geoambientes do PARNA-SG para fins comparativos com os mapas gerados pelos modelos apresentados nas imagens 2 (rf), 3 (C5.0) e 4 (avNNet).

4. CONCLUSÃO

A metodologia de Machine Learning testada neste estudo desenvolveu uma aplicação no mapeamento dos geoambientes do PARNA-SG para duas situações distintas (9 e 5 classes), utilizando 5 modelos, que tiveram um desempenho moderado em relação aos valores de kappa e acurácia obtidos para ambas as situações de análise.

Os modelos obtiveram melhores resultados quando usados para classificar 5 classes de geoambientes, ou seja, menos detalhada. Os modelos de melhor performance estatística neste caso foram RF, smvRadialSigma e avNNNet.

A análise de importância das covariáveis revelou que as principais covariáveis para a classificação de 5 classes de geoambientes foram covariáveis espectrais; enquanto na classificação mais detalhada (9 classes), destacou-se a combinação de covariáveis morfométricas e espectrais.

O modelo RF apesar de ter apresentado os melhores de valores de kappa e acurácia na classificação menos detalhada (5 classes) de geoambientes do que o modelo smvRadialSigma, nessa análise comparativa entre os diferentes modelos e o mapeamento tradicional, mostrou-se menos representativo que o modelo smvRadialSigma.

A metodologia de classificação automática de geoambientes testada neste trabalho indicou a necessidade de ajustes, embora os resultados obtidos possam ser considerados promissores como técnica de grande potencial, para futuros refinamentos na busca de melhores previsões.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Atlas Brasil. Abastecimento Urbano de Água. Brasília/DF: MMA/ANA, 2010.

ALKMIM, F.F., MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29-58, (1998).

BERNARDINO SANTOS DE MEDEIROS, D.; OLIVEIRA, A. M. DE; DINIZ, M. T. M. Georges Bertrand e a Análise Integrada da Paisagem em Geografia. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 4, n. 2, p. 63-80, 31 jul. 2018.

BERTALANFFY, L. V. The theory of open systems in physics and biology. *Science*. Washington, v. 111, p. 23- 29, 1950.

BIVAND, R. et al. rgrass7: interface between GRASS 7 geographical information system and R. R package version 0.1-9, 2016.

BRANDAO, Pedro Christo et al. Caracterização de geoambientes da floresta nacional do purus, Amazônia ocidental: uma contribuição ao plano de manejo. *Rev. Árvore*, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 115-126, Feb. 2010. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622010000100013&lng=en&nrm=iso>. Access on 16 Feb. 2021. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000100013>

BRENNING, Alexander. Statistical geocomputing combining R and SAGA: The example of landslide susceptibility analysis with generalized additive models. *Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie*, v. 19, n. 23-32, p. 410, 2008.

CAVALCANTI, L. C. S. Da Descrição de Áreas à Teoria dos Geossistemas: uma Abordagem Epistemológica sobre Sínteses Naturalistas. Tese (Doutorado em Geografia). Recife: UFPE. 2013. 217p.

DIAS, H.C.T.; Fernandes Filho, E.I.; Schaefer, C.E.G.R; Fontes, L.E.F.; Ventorim, L.B. 2002. Geoambientes do Parque Estadual do Ibitipoca, município de Lima Duarte-MG. *Revista Árvore*, 26(6):777-786.

DIAS, J. & SANTOS, L. 2007. A paisagem e o geossistema como possibilidade de leitura da expressão do espaço socioambiental rural. *Confins*, n. 1.

GOMES, Lucas Carvalho et al. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. *Geoderma*, v. 340, p. 337-350, 2019.

HIJMANS, Robert J. et al. Package ‘raster’. R package, v. 734, 2015.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

KUHN, Max et al. Package 'caret'. The R Journal. v.6.0-85 [S. 1.], 7 jan. 2020. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/caret/caret.pdf>.

Li, Congcong & Wang, Jie & Hu, Luanyun & Gong, Peng. (2013). Comparison of Classification Algorithms and Training Sample Sizes in Urban Land Classification with Landsat Thematic Mapper Imagery. *Remote Sensing*. 6. 10.3390/rs6020964.

MEIER, Martin et al. Digital Soil Mapping Using Machine Learning Algorithms in a Tropical Mountainous Area. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v. 42, e0170421, 2018. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832018000100313&lng=en&nrm=iso>. access on 28 Mar. 2021. Epub Nov 14, 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170421>.

MENDONÇA, Bruno & FERNANDES-FILHO, Elpídio & SCHAEFER, Carlos & SIMAS, Felipe & JUNIOR, José & LISBOA, Beatriz & GAIO, Júlia. (2013). Solos e geoambientes do Parque Nacional do Viruá e entorno, Roraima: visão integrada da paisagem e serviço ambiental. *Ciência Florestal*. 23. 10.5902/198050989287.

MILONE, Giuseppe. *Estatística: geral e aplicada*. Pioneira Thomson Learning, 2004.

MORALES, Giorgio; HUAMÁN, Samuel G.; TELLES, Joel. Cloud detection in high-resolution multispectral satellite imagery using deep learning. In: *International Conference on Artificial Neural Networks*. Springer, Cham, 2018. p. 280-288.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B. & KENT, J. "Biodiversity Hotspots for Conservation Priorities", in *Nature* 403, 2000, pp. 853-8.

SALGADO, A.A.R., COLIN, F., NALINI, JR., H.A., BRAUCHER, R., VARAJÃO, A.F.D.C., & VARAJÃO, C.A.C.O., (2010). O Papel da Denudação Geoquímica no Processo de Erosão Diferencial no Quadrilátero Ferrífero/MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Goiania, v.5, n. 1, p. 55-69.

SCHAEFER C.E.G.R, CAMPOS P.V, CANDIDO H.G, CORRÊA G.R, FARIA R.M, VALE Jr JF (2020) Serras e pantanais arenosos: solos e geoambientes em unidade de conservação da Amazônia, Brasil. *Neotropical Biology and Conservation* 15(1): 43-69. <https://doi.org/10.3897/neotropical.15.e49221>

SCHAEFER, C.E.G.R., Corrêa, G.R., Candido, H.G., Arruda, D.M., Nunes, J.A., Araujo, R.W., Rodrigues, P.M.S., Filho, E.I.F., Pereira, A.F.S., Brandão, P.C., Neri, A.V. 2016. The Physical Environment of Rupestrian Grasslands (Campos Rupestres) in Brazil: Geological, Geomorphological and Pedological Characteristics, and Interplays. In: Geraldo Wilson Fernandes. (Org.). Ecology and 25 Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil. 1ed.: Springer International Publishing, 563p. 15-53.

SCHAEFER, C. E. G. R., M. A. ALBUQUERQUE, J. C. F. CAMPOS, L. L. CHARMELO & F. N. B. SIMAS, 2000. Elementos da paisagem e gestão da qualidade ambiental. Informe Agropecuário 21(202): 20-44.

SEASHOLTZ, Mary Beth; KOWALSKI, Bruce. The parsimony principle applied to multivariate calibration. *Analytica Chimica Acta*, v. 277, n. 2, p. 165-177, 1993.

SILVA, J.R. & SALGADO, A.A.R. 2009. Mapeamento das unidades de relevo da região da Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Book Geografias* 5 (2): 107-125.

SOTCHAVA, V.B. 1977. O estudo de geossistemas. Instituto de Geografia. Universidade Estadual de São Paulo. São Paulo: Ed. Lunar.

SOUZA, Carolina Gusmão et al. ALGORITMOS DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA E VARIÁVEIS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA O MAPEAMENTO DA CAFEICULTURA. *Bol. Ciênc. Geod.*, Curitiba, v. 22, n. 4, p. 751-773, Dec. 2016. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-21702016000400751&lng=en&nrm=iso>. access on 27 Mar. 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702016000400043>.

SOUZA, Cristiano Marcelo Pereira et al. MACHINE LEARNING ALGORITHM IN THE PREDICTION OF GEOMORPHIC INDICES FOR APPRAISAL THE INFLUENCE OF LANDSCAPE STRUCTURE ON FLUVIAL SYSTEMS, SOUTHEASTERN-BRAZIL. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, n. 2, 2020.

VARAJÃO, C. A. C. (1991) A questão da correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. São Paulo: *Revista Brasileira de Geociências*. 21(2): 138-145

VENTURIERI, A.; SANTOS, J. R. dos. Técnicas de classificação de imagens para análise de cobertura vegetal. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Ed.). Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura. 2. ed. rev. amp. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI; Planaltina, DF: EMBRAPA-CPAC, 1998. p. 351-371.

ZAR, Jerrold H. Biostatistical analysis. Pearson Education India, 1999.

ZHANG, Lei et al. Machine learning reveals the importance of the formation enthalpy and atom-size difference in forming phases of high entropy alloys. *Materials & Design*, v. 193, p. 108835, 2020.

CONCLUSÕES GERAIS

Assim Como outros trabalhos realizados no Quadrilátero Ferrífero, esta tese vem reforçar a importância ambiental representada por essa região, em especial da Serra do Gandarela, este pedaço do Quadrilátero tão importante para a manutenção da vida urbana na região metropolitana de Belo Horizonte.

A criação de áreas prioritárias para a conservação como o PARNA-SG, só são possíveis graças a trabalhos de pesquisa e mobilizações da sociedade civil, que mostram a importância de se considerar estas áreas como estratégicas para conservação, já que a demanda de supressão destas áreas para a exploração mineral é cada vez maior.

Os resultados das avaliações geoambientais e pedológicas do PARNA-SG, mostraram a grande diversidade geoambiental e como os solos tem um papel fundamental na estratificação destes ambientes.

As metodologias testadas neste trabalho (janela móvel e modelagem de geoambientes) se mostraram bastante promissoras e apresentaram muito bons resultados, apesar de ainda precisaram de ajustes. Estes métodos deveram ser testados em diferentes escalas de trabalho. avaliando sua eficiência para estas novas situações.

A contribuição das informações e metodologias geradas neste trabalho poderão ser usados como um guia para priorização da conservação das áreas mais sensíveis e ameaçadas dentro do PARNA-SG, bem como no Quadrilátero Ferrífero e Espinhaço como um todo.