

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

LUCIANA VENTURA MACHADO

**RELAÇÃO ENTRE SOLOS E VEGETAÇÃO EM GRADIENTE
TOPOGRÁFICO DE FRAGMENTO DE FLORESTA ATLÂNTICA**

**ALEGRE – ES
2016**

LUCIANA VENTURA MACHADO

**RELAÇÃO ENTRE SOLOS E VEGETAÇÃO EM GRADIENTE
TOPOGRÁFICO DE FRAGMENTO DE FLORESTA ATLÂNTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal, na área de concentração de Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. PhD Eduardo de Sá Mendonça.

**ALEGRE – ES
2016**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

M149r Machado, Luciana Ventura, 1985-
Relação entre solos e vegetação em gradiente topográfico de
fragmento de Floresta Atlântica/Luciana Ventura Machado. – 2016.
123f. : il.

Orientador: Eduardo de Sá Mendonça.
Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal
do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Plantas e solo. 2. Topossequência. 3. Microrganismos do solo. 4.
Enzimas do solo. 5. Variabilidade sazonal. 6. Análise multivariada.
I. Mendonça, Eduardo de Sá. II. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 63

LUCIANA VENTURA MACHADO

**RELAÇÃO ENTRE SOLOS E VEGETAÇÃO EM GRADIENTE TOPOGRÁFICO DE
FRAGMENTO DE FLORESTA ATLÂNTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal, na área de concentração de Solos e Nutrição de Plantas.

Aprovada em 14 de JULHO de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. PhD Eduardo de Sá Mendonça
CCAIE-UFES (Orientador)



Prof. DSc. Diego Lang Burak
CCAIE-UFES



Prof. DSc. Miriam Cristina Alvarez Pereira
CCAIE-UFES



Prof. DSc. Marcos Vinicius Winckler Caldeira
CCAIE-UFES

A minha família, pelo seu amor incondicional e os momentos de alegria verdadeira.

Aos meus pais, Angela (*in memoriam*) e Valdir, que me deram a vida e sempre me guiaram pelo caminho do bem.

A tia Juracy por suas orações e dedicação.

Ao meu sobrinho lindo, João Francisco, fonte inesgotável de alegria e inspiração.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A DEUS, toda minha gratidão pelo dom da vida, pela força e proteção diária, por sua infinita bondade e por permitir a concretização de mais esta etapa em minha vida.

Ao meu pai e irmãos, Ramires e Ruam, pelo apoio e incentivo.

Ao professor Eduardo de Sá Mendonça, pela orientação, amizade, confiança, conselhos, paciência e pelos ensinamentos a mim dedicados durante a realização deste estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, pela oportunidade de concluir o Mestrado.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos durante o período de realização do Mestrado.

Ao professor Felipe Vaz de Andrade, pelo exemplo profissional e pelos ensinamentos valiosos na minha formação intelectual.

Aos colegas, Danilo Andrade e Diego Mathias pela ajuda durante as coletas de solo e análises laboratoriais de solo.

Ao meu estagiário, Aildson pela prontidão e relevante colaboração durante a realização das análises laboratoriais de solo.

Ao professor Mário Garbin durante o planejamento do trabalho e o colega Karlo Gregório, pela paciência e disponibilidade durante a realização dos trabalhos de campo e das análises estatísticas multivariadas.

Ao professor Adésio Ferreira pela atenção e colaboração nas análises estatísticas.

Às amigas Letícia Heitor, Cristiane Barbosa, Natália Lima e Anarely Alvarenga pela amizade, risadas e bons momentos compartilhados durante estes dois anos.

Aos amigos, Luís Moreira e Mariana Lima, pessoas que o Mestrado me presenteou e admiro, nesse tempo muito contribuíram para meu crescimento pessoal, jamais me esquecerei da alegria de compartilhar bons momentos com vocês. Obrigada pelas prosas e momentos de descontração. A amizade é recíproca!

Aos colegas dos Laboratórios de Química e Física do Solo e Matéria Orgânica do Solo pelas experiências e conhecimentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu irmão Ramires pelo apoio, a minha cunhada Lidiane pelas sugestões nas análises estatísticas deste estudo, e por me darem meu maior presente: João Francisco!

Ao professor Diego Lang Burak pela prontidão, paciência, colaboração e sugestões para o aprimoramento deste estudo.

Ao professor Marcos Vinicius Winckler Caldeira e a professora Míriam Cristina Alvarez Pereira pela gentileza em participar da comissão examinadora de defesa da dissertação e suas colaborações para o aperfeiçoamento deste estudo.

As secretárias do Programa de Pós-Graduação, Madalena e Alessandra pela atenção e prestatividade.

Ao professor Otacílio José Passos Rangel, pela amizade e incentivo a seguir os caminhos da vida acadêmica.

Agradeço pela oportunidade de conduzir este estudo, pelas pessoas que conheci durante a realização do mesmo, por tudo que aprendi, por todos os dias dedicados a ele. Com este trabalho eu cresci e aprendi muito com meus erros, acertos e, principalmente, com as pessoas que eu encontrei.

Obrigada!

Para todas as realizações há um momento certo; existe sempre um tempo apropriado para todo o propósito debaixo do céu.

Eclesiastes 3:1

RESUMO GERAL

MACHADO, Luciana Ventura. **Relação entre solos e vegetação em gradiente topográfico de fragmento de Floresta Atlântica**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES, 2016.

As florestas tropicais reconhecidamente apresentam grande diversidade de espécies vegetais, distribuídas em diferentes fitofisionomias. Essa diversidade fitofisionômica pode advir da alta variação biogeoquímica, variações climáticas, topografia, material de origem do solo, atividade microbiana, química do solo, suscetibilidade à erosão e tempo. A combinação entre esses fatores é capaz de afetar o desenvolvimento e distribuição das espécies vegetais. O objetivo deste estudo foi analisar a relação dos atributos do solo com a comunidade arbóreo-arbustiva em gradiente topográfico de um fragmento de Floresta Atlântica no sul do Estado do Espírito Santo. O estudo foi realizado no Parque Estadual Mata das Flores, município de Castelo, Espírito Santo, Brasil. As parcelas foram alocadas em um transecto de 750 metros ao longo de um gradiente topográfico que varia de 100 m a 180 m de altitude, dispostas em pares distantes 10 metros entre si e a distância entre os pares variando de 20 a 25 m. Procedeu-se a caracterização química e física do solo nas profundidades 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m. Realizou-se a caracterização dos atributos biológicos na profundidade de 0,0-0,10 m em duas épocas do ano, verão (fevereiro/2015) e inverno (agosto/2015). Análise de Componentes Principais, Análise de Redundância e Análise de Escalonamento Multidimensional Não-Métrico foram utilizadas para análise estatística dos dados. Os resultados indicaram que o solo da baixada apresentou maiores teores de bases trocáveis (Ca, Mg, Na, K), P e teor de Areia Fina. Em contrapartida, o solo do topo apresentou maior acidez potencial (H+Al), menos nutrientes disponíveis, e com maiores teores de argila. As parcelas da encosta apresentaram condição intermediária entre o topo e a baixada no Domínio Morfoclimático Mar de Morros no bioma Floresta Atlântica da região Sudeste. O C da biomassa microbiana (CBM), a respiração basal (RBSA), o quociente microbiano (qMIC), o quociente metabólico (qCO₂) e a atividade da β-glucosidase foram afetados pela sazonalidade. Os resultados indicaram que os solos da baixada, com melhor fertilidade química natural, correlacionaram-se com *Actinostemon concolor*, *Guapira opposita*, *Sorocea bonplandii*, Fabaceae, *Sarcaulus brasiliensis* e *Rauia resinosa*. No verão, as espécies *Actinostemon concolor*, *Guapira opposita*, *Rauia resinosa*, *Sorocea bonplandii* e *Sarcaulus brasiliensis* promoveram maior atividade enzimática da fosfatase ácida, desidrogenase, teores de CBM e NBM do solo nas parcelas da baixada. No

inverno não foi verificada correlação dos atributos do solo com a vegetação no fragmento de Floresta Atlântica no sul do Espírito Santo. Planos de manejo para a manutenção e aproveitamento da biodiversidade de ecossistemas naturais devem considerar a interação entre os diferentes tipos de solo, vegetação, paisagem e seus efeitos diversos sobre a estrutura e função do ecossistema.

Palavras-chaves: Relação solo-vegetação. Toposequência. Floresta tropical. Atividade microbiana. Enzimas do solo. Variabilidade sazonal. Análise multivariada.

GENERAL ABSTRACT

MACHADO, Luciana Ventura. **Relationship between soil and vegetation in topographic gradient Atlantic Forest fragment.**

Rainforests have known great diversity of plant species distributed in different vegetation types. This physiognomy diversity can result from high variation biogeochemistry, climate variability, topography, soil parent material, microbial activity, soil chemistry, susceptibility to erosion and time. The combination of these factors can affect the development and distribution of plant species. The aim of this study was to analyze the relationship of soil attributes with tree and shrub community topographic gradient of a fragment of the Atlantic Forest in the southern state of Espírito Santo. The study was conducted in the Mata das Flores State Park, Castelo municipality, Espírito Santo, Brazil. The plots were allocated in a transect of 750 meters along the topographic gradient ranging from 100 m to 180 m altitude, arranged in pairs 10 meters distant from each other and the distance between the pairs ranging from 20 to 25 m. Proceeded to the chemical and physical soil depths from 0.0 to 0.10 and 0.10-0.20 m. Was held the characterization of biological attributes in depth from 0.0 to 0.10 m in two seasons, summer (February/2015) and winter (August/2015). Principal Component Analysis, Redundancy Analysis and Multidimensional Scaling Analysis Non-Metric were used for statistical analysis. The results indicated that the lowered soil showed higher levels of exchangeable bases (Ca, Mg, Na, K), P and sand content. By contrast, the top soil had greater potential acidity (H+Al), fewer nutrients available, and with higher clay content. The side of the plots showed intermediate condition between the top and lowered in the Morphoclimatic feature of Mar de Morros in the Atlantic Forest in the Southeast. The microbial biomass C (CBM), basal respiration (RBSA), microbial quotient (qMIC), metabolic quotient (qCO₂) and the activity of β -glucosidase were affected by seasonality. The results indicated that the lowered soils, with better natural chemical fertility, correlated with *Actinostemon concolor*, *Guapira opposita*, *Sorocea bonplandii*, *Guapira opposita*, Fabaceae, *Sarcaulus brasiliensis*, *Rauia resinosa*. In summer, *Actinostemon concolor*, *Guapira opposita*, *Rauia resinosa*, *Sorocea bonplandii* e *Sarcaulus brasiliensis* promoted greater enzymatic activity of acid phosphatase, dehydrogenase, CBM content and soil NBM in the lowered of installments. In winter it was not verified correlation of soil properties with vegetation in the Atlantic Forest fragment in the south of the state of Espírito Santo. Management plans for the maintenance and use of the biodiversity of natural ecosystems must consider the interaction between the

different types of soil, vegetation, landscape and its various effects on ecosystem structure and function.

Keywords: Soil-vegetation relationship. Toposequence. Tropical forest. Microbial activity. Soil enzymes. Seasonal variability. Multivariate analysis.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 - Descrição geral das parcelas de coleta das amostras de solo em Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil.....33

Tabela 2 - Componentes principais (CP_i), autovalores (λ_i), variância explicada pelos componentes principais e correlação (1) entre variáveis originais e componentes principais na profundidade de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m.....41

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Descrição geral das parcelas de coleta das amostras de solo em Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil.....58

Tabela 2 - Componentes principais (CP_i), autovalores (λ_i), variância explicada pelos componentes principais e correlação (1) entre variáveis originais e componentes principais no período verão e inverno, respectivamente.....67

Tabela 3 - Resultado da Análise parcial de redundância (pRDA). Atributos biológicos (B) foram usados como matriz resposta a três fontes de variação: (Q) atributos químicos, (F) atributos físicos e (T) atributos topográficos.....74

CAPÍTULO 3

Tabela 1 - Descrição geral das parcelas de coleta das amostras de solo em Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil.....92

Tabela 2 – Composição de espécies nas parcelas de baixada, encosta e topo de morro em fragmento de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil.....94

Tabela 3 - Escalonamento Multidimensional Não Métrico (NMDS) das espécies florestais, atributos químicos e físicos do solo nas profundidades de 0,0-0,10 m 0,10-0,20 m em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil.....96

Tabela 4 - Escalonamento Multidimensional Não Métrico (NMDS) das espécies florestais, atributos biológicos do solo no verão e inverno, em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil.....99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da região de estudo, Parque Estadual Floresta das Flores, Castelo-ES22

Figura 2 - Climograma da região de Alegre, Espírito Santo. P – Precipitação; T_{máx} – Temperatura máxima; T_{mín} – Temperatura mínima; T_{méd} – Temperatura média para o ano de 2015. P40 – precipitação média do período (1950-1990); T_{méd40} – Temperatura média do período (1950-1990).....23

CAPÍTULO 1

Figura 1 – Caracterização química e física das amostras de solo coletadas na profundidade de 0,60-0,80 m em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil. S/A = relação Silte/Argila; Ta/Tb = atividade da fração argila; T = CTC a pH 7,0; V = saturação por bases; m = saturação por alumínio; PST = porcentagem de sódio trocável.....37

Figura 2 - Média e erro-padrão dos atributos químicos do solo na profundidade de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil. pH = pH em H₂O; P = fósforo disponível; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Na = sódio; H+Al = acidez potencial; COT = carbono orgânico total.....39

Figura 3 - Média e erro-padrão dos atributos físicos do solo na profundidade de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil. GF = grau de floculação; PT = porosidade total; Micro = microporosidade40

Figura 4 - Análise de componentes principais (CP1 e CP2) dos valores médios dos atributos químicos e físicos do solo nas profundidades (a) 0,0-0,10 m e (b) 0,10-0,20 m em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil. Ca = cálcio, Mg = magnésio, K = potássio, Na = sódio, COT = carbono orgânico total, Micro = microporosidade, GF = grau de floculação, H+Al = acidez potencial44

Figura 5 - Análise de redundância dos valores médios dos atributos químicos e físicos do solo para a profundidade (a) 0,0-0,10 m e (b) 0,10-0,20 m e variáveis topográficas, em área de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil45

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Caracterização biológica das amostras de solo coletadas na profundidade de 0,0-0,10 m em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, no verão e inverno, Espírito Santo, Brasil. CBM = carbono da biomassa microbiana; qMIC = quociente microbiano ; NBM = nitrogênio da biomassa microbiana; NMA = nitrogênio mineralizável anaerobicamente; RBSA = respiração basal do solo acumulada (mg C-CO₂ kg⁻¹ de solo); qCO₂ = quociente metabólico (μg C-CO₂. μg⁻¹ CBM dia⁻¹), FA = fosfatase ácida; BG = β-glucosidase; DES = desidrogenase63

Figura 2 - Análise de componentes principais (CP1 e CP2) dos valores médios dos atributos biológicos do solo na profundidade de 0,0-0,10 m no período verão (a) e inverno (b) em gradiente topográfico, em Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil. CBM = carbono da biomassa microbiana; qMIC = quociente microbiano; NBM = nitrogênio da biomassa microbiana; RBSA = respiração basal do solo acumulada (mg C-CO₂ kg⁻¹ de solo); FA = fosfatase ácida; BG = β-glucosidase; DES = desidrogenase68

Figura 3 - Análise de redundância dos valores médios dos atributos biológicos do solo na profundidade de 0,0-0,10 m e variáveis topográficas no período verão (a) e inverno (b), em área de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil70

Figura 4 - Média e erro padrão da umidade das amostras de solo coletas na profundidade de 0,0-0,10 m no período verão e inverno, em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil72

Figura 5 - Diagrama de Venn mostrando a divisão da variação dos atributos biológicos do solo relativo a três fontes: (Q) atributos químicos do solo, (F) atributos físicos e (T) variáveis topográficas em Floresta Atlântica. Valores de R² ajustado em %. Os valores negativos não são mostrados (em branco)75

CAPÍTULO 3

Figura 1 - Análise de Escalonamento Multidimensional Não Métrico (NMDS1 e NMDS2) das espécies florestais, atributos químicos e físicos do solo na profundidade de 0,0-0,10 m (a) e 0,10-0,20 m (b) em gradiente topográfico de Floresta Atlântica. Vetores representam atributos químicos, físicos do solo e topográficos. Micro = microporosidade; P = fósforo; Ca

= cálcio; Mg = magnésio; pH = pH em H₂O; Na = sódio. Plotagem somente dos atributos com significância $p < 0,1$. Total de 25 parcelas de acordo com a Tabela 1. Abreviaturas das espécies de acordo com a Tabela 2. *Stress* = 0,22.....97

Figura 2 – Análise de Escalonamento Multidimensional Não Métrico (NMDS1 e NMDS2) das espécies florestais, atributos biológicos no verão (a) e inverno (b), em gradiente topográfico de Floresta Atlântica. Vetores representam atributos biológicos do solo e topográficos. CBM = carbono da biomassa microbiana; DES = desidrogenase; FA = fosfatase ácida; NBM = nitrogênio da biomassa microbiana. Plotagem somente dos atributos com significância $p < 0,1$. Total de 25 parcelas de acordo com a Tabela 1. Abreviaturas das espécies de acordo com a Tabela 2. *Stress* = 0,22.....100

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	19
1.1 Caracterização da área de estudo	22
2. Objetivos	24
2. Objetivo Geral.....	24
2.1. Objetivos Específicos.....	24
3. REFERÊNCIAS	24

CAPÍTULO 1: ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO AO LONGO DE GRADIENTE TOPOGRÁFICO EM FRAGMENTO DE FLORESTA ATLÂNTICA NO SUL DO ESPÍRITO SANTO

Resumo	28
Abstract	29
1. INTRODUÇÃO	30
2. MATERIAL E MÉTODOS	31
2.1. Caracterização da área de estudo	31
2.2. Amostragem e coleta de dados	32
2.3. Atributos químicos do solo	34
2.4. Atributos físicos do solo	34
2.5. Análise estatística dos dados	35
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4. CONCLUSÕES	46
5. REFERÊNCIAS	47

CAPÍTULO 2: ATRIBUTOS BIOLÓGICOS DO SOLO EM GRADIENTE TOPOGRÁFICO DE FRAGMENTO DE FLORESTA ATLÂNTICA NO SUL DO ESPÍRITO SANTO.....

Resumo	52
Abstract	53
1. INTRODUÇÃO	54
2. MATERIAL E MÉTODOS	56
2.1. Caracterização da área de estudo	56
2.2. Amostragem e coleta de dados	57
2.3. Análises laboratoriais de solo	59
2.3.1. Carbono orgânico (COT), Nitrogênio total (NT) e relação COT/NT	59
2.3.2 Nitrogênio mineralizável anaerobicamente (NMA)	59
2.3.3. C e N da biomassa microbiana do solo (CBM e NBM).....	60
2.3.4. Respiração basal de C-CO ₂ (Emissão de CO ₂).....	60
2.3.5. Atividade enzimática da Fosfatase ácida, β-glucosidade e Desidrogenase.....	61
2.4. Análise estatística dos dados.....	61
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
3.1. Efeito dos períodos verão e inverno nos atributos biológicos.....	71
3.2. Relação entre atributos químicos, físicos, biológicos e topográficos	74
4. CONCLUSÕES	77
5. REFERÊNCIAS	78

CAPÍTULO 3: RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS DO SOLO E ESPÉCIES ÁRBOREO-ARBUSTIVAS DE SUB-BOSQUE EM TOPOSSEQUÊNCIA DE FLORESTA ATLÂNTICA NO SUL DO ESPÍRITO SANTO	85
Resumo	85
Abstract	86
1. INTRODUÇÃO	87
2. MATERIAL E MÉTODOS	90
2.1. Caracterização da área de estudo.....	90
2.2. Amostragem e coleta de dados	90
2.3. Atributos químicos do solo	91
2.4. Atributos físicos do solo	93
2.5. Atributos biológicos do solo	93
2.6. Espécies florestais	93
2.7. Análise estatística dos dados	95
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
4. CONCLUSÕES	101
5. REFERÊNCIAS	102
CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
APÊNDICES	109

1. INTRODUÇÃO GERAL

Os ecossistemas florestais, mundialmente, vêm sendo pressionados continuamente pelo crescimento populacional e pelo inadequado uso e gestão dos recursos naturais. Os efeitos das mudanças no uso da terra sobre os ecossistemas, especialmente em Florestas Tropicais, têm recebido atenção no decorrer dos anos, principalmente em relação à diminuição da biodiversidade de plantas, animais e alterações no armazenamento de carbono do solo e fluxos de gases traços (PARRON, 2004), como o dióxido de carbono (CO₂), o óxido nitroso (N₂O) e o metano (CH₄) (CERRI et al., 2007).

A história brasileira está fortemente ligada à Floresta Atlântica, que detém elevada biodiversidade e é considerada um dos mais importantes biomas mundiais. Não obstante, ela também carrega o dogma de ser um dos biomas mais ameaçados, sendo considerado um hotspot para conservação, em razão de seu alto grau de endemismo e ameaças de extinções iminentes (MYERS et al., 2000).

É notório que os ecossistemas apresentam efeitos significativos sobre os principais ciclos biogeoquímicos e o clima global e também abrigam notável diversidade biológica. Contudo, ainda há dificuldade em relacionar de forma determinística a heterogeneidade de solos com a diversidade e estrutura de comunidades vegetais (WERNER; HOMEIER, 2015).

A relação entre solos e vegetação é complexa e, apesar de ter um histórico de estudos, ainda carece de poder preditivo, principalmente em escalas intermediárias, onde os efeitos de fatores determinísticos (tipos de solo, por exemplo) e de eventos estocásticos (dispersão aleatória, por exemplo) se confundem (GARBIN; CARRIJO; MENDONÇA, 2013), o que tornam necessárias as informações sobre quais variáveis ambientais são mais responsivas sobre a distribuição e abundância de espécies (SARCINELLI et al., 2012), em especial, no bioma Floresta Atlântica. Diante disso, ecólogos e pesquisadores de solos têm desenvolvido estudos a partir de dados qualitativos e quantitativos do solo a fim de elevar o nível de informações quanto à variabilidade desse recurso, quanto às relações entre solo-vegetação, potencial de uso e formação de paisagem (CAMPOS et al., 2010; CARMO; JACOBI, 2015; DUBUIS et al., 2012; JOHN et al., 2007; SCIPIONI et al., 2012; TOLEDO et al., 2009; WERNER; HOMEIER, 2015).

Conforme demonstrado por Martins et al. (2003), as variações na fertilidade e textura do solo ao longo do gradiente topográfico determinaram a distribuição das espécies arbóreas com

DAP \geq 4,8 cm no gradiente, principalmente entre a baixada (solo mais arenoso, mais fértil, menos ácido) e topo (solo mais argiloso, baixos teores de macronutrientes e elevada acidez). Rovedder et al. (2014) indicaram que a relação de grupos fitossociológicos com a qualidade química do solo em remanescente de Floresta Estacional Decidual na região central do Rio Grande do Sul foi maior no intervalo de maior declividade (35-45°), enquanto os principais atributos de solo que diferenciaram os ambientes foram pH, Ca, t, m, e V.

Neste contexto, é importante notar que a biomassa microbiana e sua atividade têm sido apontadas como características altamente sensíveis às alterações na qualidade do solo, causadas por mudanças de uso e práticas de manejo (TRANNIN; SIQUEIRA; MOREIRA, 2007). Os valores obtidos para biomassa microbiana variam com o tipo de solo, vegetação e clima, e sua quantidade está relacionada com a quantidade e qualidade de carbono que o solo recebe (SILVEIRA, 2007).

Os microrganismos produzem enzimas que são mediadoras dos processos biogeoquímicos (incluindo reações inorgânicas e de redução) e da decomposição e mineralização dos nutrientes (WALLENSTEIN; BURNS, 2011). Essa atividade, por sua vez, é afetada por fatores físicos, temperatura, umidade, pH do solo (ACOSTA-MARTINEZ et al., 2007; SAMUEL et al., 2010) e características da serrapilheira (SAMUEL et al., 2010). Em razão disso, as análises enzimáticas revelam grande potencial como indicadores sensíveis para detectar diferenças entre solos e determinar sua qualidade (JAKELAITIS et al., 2008).

É importante notar que as enzimas do solo apresentam um padrão de atividade variável ao longo do ano, em função das condições climáticas e de seus respectivos efeitos sobre a atividade da vida do solo (BERGSTROM; MONREAL; KING, 1998). O ciclo de fósforo (P) no solo depende da imobilização, mineralização e distribuição de P, controladas pelas propriedades físicas e químicas do solo (adsorção de P nas superfícies coloidais e reações de precipitação) como também, depende de reações mediadas por fosfatases (STEWART; TIESSEN, 1987).

As enzimas fosfatases são fundamentais na mineralização do fósforo e, conseqüentemente, na ciclagem deste nutriente no solo. Elas apresentam-se amplamente distribuídas no solo e catalisam a hidrólise de fósforo orgânico em fósforo inorgânico, tornando-o disponível para a planta (ACOSTA-MARTINEZ; TABATABAI, 2011; TABATABAI, 1994). As fosfomonoesterases, tais como fosfatase ácida e fosfatase alcalina, são as fosfatases mais estudadas no solo, diferindo-se na sua especificidade para o substrato e seu pH ótimo, que

varia de ácido a alcalino, respectivamente (ACOSTA-MARTINEZ; TABATABAI, 2011; SAMUEL et al., 2010). A oxidação biológica de compostos orgânicos é geralmente um processo de desidrogenação, assim a enzima desidrogenase pode atuar como um bom indicador da atividade microbiana presente no solo (GARCIA; HERNADEZ; COSTA, 1997). São geralmente consideradas substrato-específicas e desempenham um papel-chave no processo de decomposição, em especial, para as bactérias, que são consumidores finais e também mineralizam os compostos aromáticos (BURNS et al., 2013). A enzima β -glucosidase atua na etapa final do processo de decomposição da celulose, hidrolisando os resíduos de celobiose (TABATABAI, 1994). A atividade enzimática da β -glucosidase tem grande importância no fornecimento de fontes de carbono (C) como principal fonte de energia para microrganismos do solo (DENG; POPOVA, 2011).

As características que envolvem o perfil do solo e os fatores topográficos também podem explicar a variação da intensidade da atividade microbiana. A atividade da fosfatase decresce com o aumento da profundidade do solo (SAMUEL et al., 2010) e as variações topográficas podem afetar o ciclo de carbono e nitrogênio microbianos em razão da diversidade de microclimas (LUIZÃO et al., 2004; TRACY; FRANK, 1998).

Flutuações na umidade do solo induzem oscilações na população de microrganismos do solo, resultando em pulsos de liberação de nutrientes. Esses ciclos na disponibilidade de nutrientes e umidade do solo podem aumentar a assimilação de nutrientes limitantes pelas plantas (KAISER et al., 2010; ORIAN; DIRZO; CUSHMAN, 1996). Há evidências que as taxas de exsudação de plantas aumentam com o aumento de CO_2 (PHILLIPS; FINZI; BERNHARDT, 2011), podendo afetar a estabilidade da matéria orgânica do solo (SCHIMID et al., 2011) e, promover alteração na disponibilidade de C e outros nutrientes nos solos (KAISER et al., 2010).

Contudo, ainda não existem informações, em número suficiente e, analisadas em conjunto, que permitam conhecer como a variabilidade da comunidade arbóreo-arbustiva se relaciona com as características dos diferentes tipos de solo, especialmente em solos tropicais (PULLA et al., 2016; WILLIAMS et al., 2002). Sendo assim, o papel da heterogeneidade de recursos em solos tropicais precisa ser avaliado com o apoio de ferramentas estatísticas modernas (GARBIN; CARRIJO; MENDONÇA, 2013), que permitam quantificar o grau de dependência entre vegetação, material de origem, recursos e atividade enzimática do solo em múltiplas escalas.

Face à tamanha complexidade da relação solo-vegetação-relevo é fundamental que algumas lacunas do conhecimento técnico-científico sejam respondidas, como, por exemplo, qual a relação entre os componentes físico, químico e enzimático do solo dentro de Florestas Tropicais? Como a heterogeneidade em solos explica padrões de diversidade e composição de espécies vegetais? Em que escalas? Os resultados desses estudos podem fornecer as bases para entender como os ecossistemas são formados e como variam no tempo e no espaço, em especial, no que tange as regiões de Mar de Morros no sudeste Brasileiro, e a partir disso, subsidiar o desenvolvimento de estratégias para manutenção e aproveitamento da biodiversidade dos ecossistemas.

1.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em um fragmento florestal, no Parque Estadual Mata das Flores, localizado nas coordenadas $20^{\circ}35'54''$ S e $41^{\circ}10'53''$ W, com área aproximada de 800 ha, localizado adjacente à área urbana do município de Castelo, Macrorregião Sul do Espírito Santo – Brasil (Figura 1). A precipitação anual no município varia entre 1.500 e 2.000 mm, sendo o clima do tipo subtropical, com verão temperado, sem estação seca (Cfb), de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013).

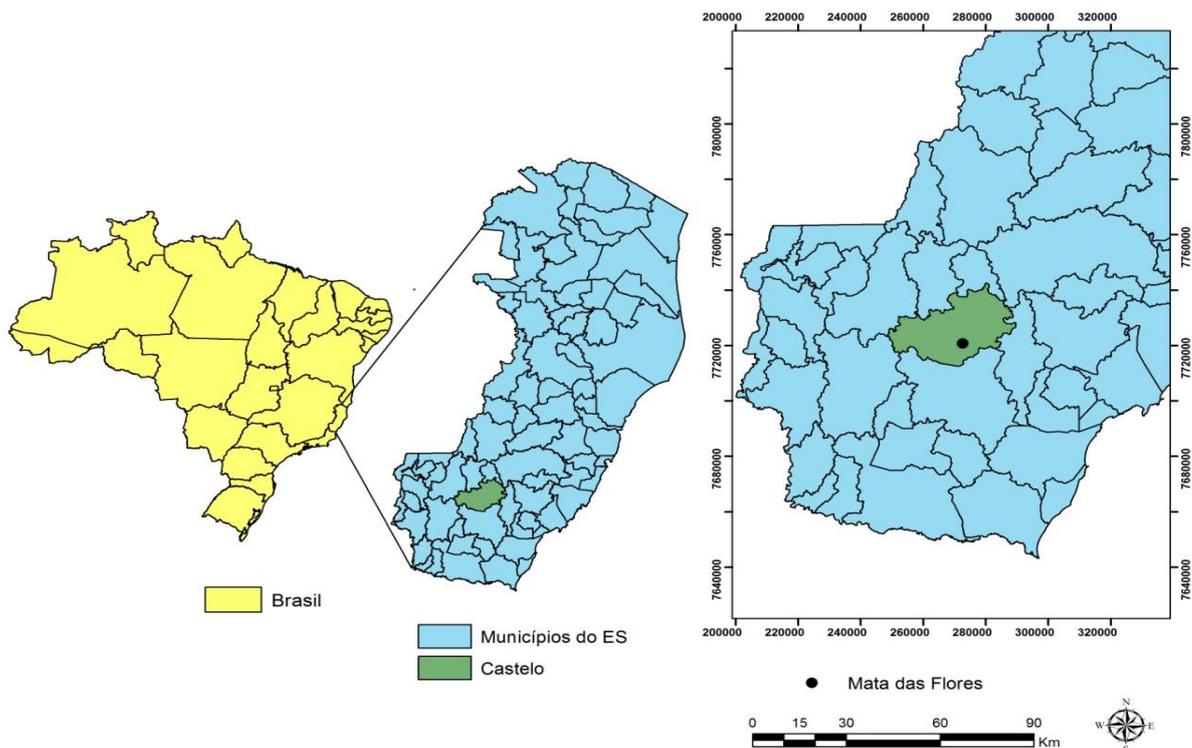


Figura 1 - Mapa de localização da região de estudo, Parque Estadual Mata das Flores, Castelo-ES, Brasil.

O Parque situa-se no domínio da Floresta Atlântica (Floresta Ombrófila Densa Montana e Estacional Semidecidual (IBGE, 2004). A área é um dos últimos remanescentes florestais de Floresta Atlântica protegidos da região e é também um corredor ecológico importante adjacente aos Parques Estaduais de Forno Grande e Parque Estadual da Pedra Azul, situados em áreas de maior altitude. O Parque é administrado pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA). No Parque ocorrem espécies como *Cedrela*, *Cássia*, Bromélias e Palmáceas e a fauna é composta por pacas, raposas, preguiças, ouriços e macacos-prego. O entorno imediato do Parque é constituído principalmente por propriedades rurais que cultivam cafeeiros e criam gado (IEMA, 2016).

Considerando a inexistência de estação meteorológica no Município de Castelo, foram utilizados neste estudo, os dados climatológicos da estação de superfície automática do município de Alegre-ES, em razão da proximidade da altitude desse município com a altitude da área de estudo. A precipitação acumulada registrada pela estação de Alegre (20°45'S, 41°29'W; 138 m) no período de janeiro/2015 a dezembro/2015 foi de 911,2 mm, a média das temperaturas mínimas foi de 16,8 °C e a média das temperaturas máximas de 37,4°C (Figura 2). As temperaturas médias e precipitações mensais do período de 1950 a 1990 (ALVARES et al., 2013) seguem na Figura 2.

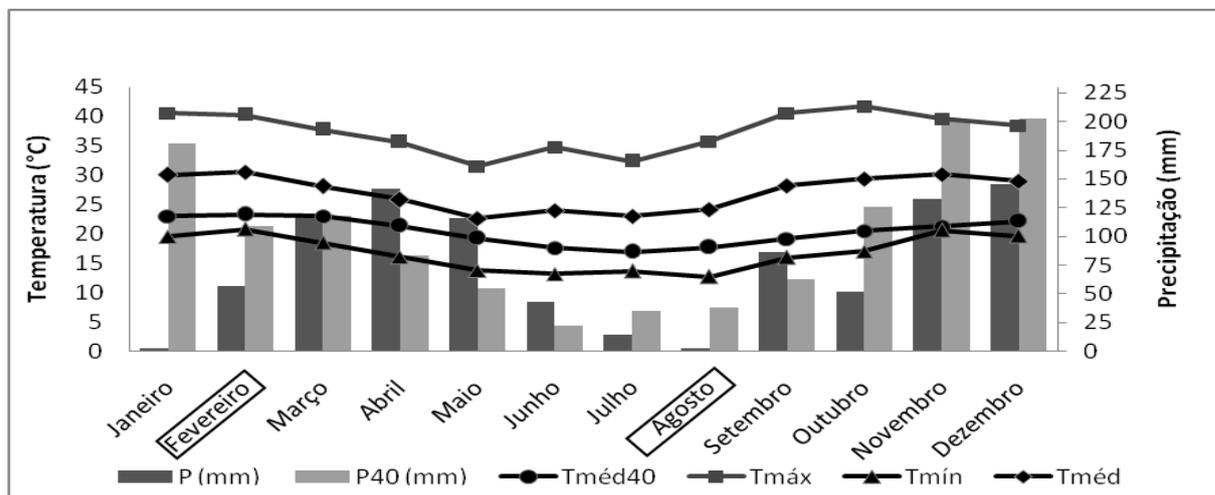


Figura 2 - Climograma da região de Alegre, Espírito Santo. P – Precipitação; Tmáx – Temperatura máxima; Tmín – Temperatura mínima; Tméd – Temperatura média para o ano de 2015. P40 – precipitação média do período (1950-1990); Tméd40 – Temperatura média do período (1950-1990).

Fonte: Estação de superfície automática do município de Alegre – INMET (2015).
Alvares et al. (2013).

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Analisar a relação dos atributos do solo com a comunidade arbóreo-arbustiva em gradiente topográfico de um fragmento de Floresta Atlântica no sul do Estado do Espírito Santo.

2.2. Objetivos Específicos

Quantificar a variação dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo e como essa estrutura se relaciona com a variação topográfica do terreno e a abundância de árvores/arbustos no gradiente;

Avaliar a atividade enzimática da fosfatase ácida, β -glucosidase e desidrogenase em gradiente topográfico em fragmento de Floresta Atlântica;

Quantificar o efeito da variação sazonal (verão e inverno) sobre as características biológicas do solo.

3. REFERÊNCIAS

ACOSTA-MARTINEZ, V. et al. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. **Applied Soil Ecology**, v. 35, n. 1, p. 35-45, 2007.

ACOSTA-MARTINEZ, V.; TABATABAI, M. A. Phosphorus Cycle Enzymes. In: DICK, R. P., (Ed.). *Methods of Soil Enzymology*. Madison, Soil Science Society of America, 2011. p. 161-183, Chapter 8, (Special Publication, 9).

ALVARES, C. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Fast Track, p.1-18, 2013.

BERGSTROM, D. W.; MONREAL, C. M.; KING, D. J. Sensitivity of soil enzyme activities to conservative practices. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 1286-1294, 1998.

BURNS, R. G. et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 58, p. 216-234, 2013.

CAMPOS, M. C. C. et al. A. Interferências dos pedoambientes nos atributos do solo em uma topossequência de transição Campos/Floresta. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 4, p. 527-535, 2010.

CARMO, F. F.; JACOBI, C. M. Diversity and plant trait-soil relationships among rock outcrops in the Brazilian Atlantic rainforest. **Plant Soil**, p.1-14, 2015.

CERRI, C. E. P. et al. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.

DENG, S.; POPOVA, I. Carbohydrate Hydrolases. In: DICK, R. P., (Ed.). *Methods of Soil Enzymology*. Madison, Soil Science Society of America, 2011. p. 185-208, Chapter 9, (Special Publication, 9).

DUBUIS, A. et al. Improving the prediction of plant species distribution and community composition by adding edaphic to topo-climatic variables. **Journal of Vegetation Science**, v. 24, n. 4, p. 593-606, 2012.

GARBIN, M. L.; CARRIJO, T. T.; MENDONÇA, E. S. Relação entre comunidades vegetais e solos no espaço: uma trilha antiga, mas com um longo caminho a ser percorrido. In: Tomaz, M. A.; Amaral, J. F. T. do; Oliveira, F. L. de; Coelho, R. I. (Ed.). 2013. *Tópicos Especiais em Produção Vegetal IV*. 1ed. Alegre, ES: CAUFES, 2013, v. 4, p. 667-683.

GARCIA, T. C.; HERNANDEZ, T.; COSTA, F. Potencial use of dehydrogenase activity as index of microbial activity in degraded soils. **Communications in Soil Science and Plant analysis**, v. 28, p.123-134, 1997.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapas de biomas e de vegetação. 2004. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>>. Acesso: 02/03/16.

IEMA. INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. Parque Estadual Mata das Flores. 2016. Disponível em <<http://www.meioambiente.es.gov.br/>>. Acesso em 10 de março 2016.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. 2015. Disponível em:<<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em março de 2016.

JAKELAITIS, A. et al. Qualidade da camada superficial de solo sob floresta, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 38, n. 2, p. 118-127, jun. 2008.

JOHN, R. et al. Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 3, p. 864-869, 2007.

KAISER, C. et al. Belowground carbon allocation by trees drives seasonal patterns of extracellular enzyme activities by altering microbial community composition in a beech forest soil. **New Phytologist**, v. 187, n. 3, p. 843-858, 2010.

LUIZÃO, R. C. C. et al. Variation of carbon and nitrogen cycling processes along a topographic gradient in a central Amazonian forest. **Global Change Biology**, v. 10, p. 592–600, 2004.

MARTINS, S. V. et al. Distribuição de espécies arbóreas em um gradiente topográfico de Floresta Estacional Semidecidual em Viçosa, MG, **Scientia Florestalis**, n.64, p. 172-181, dez. 2003.

- MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853–858, fev. 2000.
- ORIAN, G. H.; DIRZO, R.; CUSHMAN, H. Impact of biodiversity on tropical forest ecosystem process. Functional roles of biodiversity: A global perspectives. (Ed.). Mooney et al.(1996). Berlin: Spring Verlag, 1996, p.195-220.
- PARRON, L. M. **Aspectos da ciclagem de nutrientes em função do gradiente topográfico em uma Floresta de galeria no Distrito Federal**. 202 f. Tese. Doutorado em Ecologia. Instituto de Ciências Biológicas. Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 2004.
- PHILLIPS, R. P.; FINZI, A. C.; BERNHARDT, E. S. Enhanced root exudation induces microbial feedbacks to N cycling in a pine forest under long-term CO₂ fumigation. **Ecology letters**, v. 14, n. 2, p. 187-194, 2011.
- PULLA, S. et al. Controls of soil spatial variability in a dry tropical forest. **Plos One**, v. 11, n. 4, apr. 2016.
- ROVEDDER, A. P. M. et al. Relação solo-vegetação em remanescente da Floresta Estacional Decidual na Região Central do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.44, n.12, dec. 2014.
- SAMUEL, A. D. et al. The estimation of phosphatase activity in soil. **Research Journal of Agricultural Science**, v. 42, n. 3, 2010.
- SARCINELLI, T. S. et al. Representatividade fisiográfica e pedológica de fragmentos de floresta nativa em áreas de plantios homogêneos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 36, n. 3, p. 499-509, mai./jun., 2012.
- SCHMIDT, M. W. et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 49-56, out. 2011.
- SCIPIONI, M. C. et al. Análise fitossociológica de um fragmento de Floresta Estacional em uma catena de solos no Morro do Cerrito, Santa Maria, RS. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, p. 457-466, jul./set. 2012.
- SILVEIRA, A. O. **Atividades enzimáticas como indicadores biológicos da qualidade de solos agrícolas do Rio Grande do Sul**. 81 f. Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2007.
- STEWART, J. W. B.; H. TIESSSEN. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, v. 4, p. 41–60, 1987.
- TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R.W.; SCOTT, A.; BOTTOMELEY, P.J., (Ed.). *Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties*. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p. 778-835. (Special Publication, 5).
- TOLEDO, L. O. et al. Análise multivariada de atributos pedológicos e fitossociológicos aplicada na caracterização de ambientes de cerrado no norte de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 33, n. 5, p. 957-968, 2009.

TRACY, B. F.; FRANK, D. A. Herbivore on soil microbial biomass and nitrogen mineralization in a northern grassland ecosystem: Yellowstone National Park. **Oecologia**, v. 114, p. 556-562, 1998.

TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Características biológicas do solo indicadoras de qualidade após dois anos de aplicação de biossólido industrial e cultivo de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 1173-1184, set./out., 2007.

WALLENSTEIN, M. D.; BURNS, R. G. Ecology of extracellular enzyme activities and organic matter degradation in Soil: A Complex Community-Driven Process. In: Dick, R.P. (Ed.), *Methods of Soil Enzymology*. Madison, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, p.35-48, 2011.

WERNER, F. A.; HOMEIER, J. Is tropical montane forest heterogeneity promoted by a resource-driven feedback cycle? Evidence from nutrient relations, herbivory and litter decomposition along a topographical gradient. **Functional Ecology**, v. 29, n. 3, p. 430-440, 2015.

WILLIAMS, M. et al. Heterogeneity of soils and vegetation in an eastern Amazonian rain forest: implications for scaling up biomass and production. **Ecosystems**, v. 5, n. 7, p. 692–704, 2002.

CAPÍTULO 1

ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO AO LONGO DE GRADIENTE TOPOGRÁFICO EM FRAGMENTO DE FLORESTA ATLÂNTICA NO SUL DO ESPÍRITO SANTO

Resumo

A heterogeneidade dos atributos do solo depende da dinâmica na paisagem, bem como dos processos pedogenéticos. A combinação entre esses fatores é capaz de influenciar o crescimento das plantas e sua distribuição em diferentes escalas ao longo do tempo e espaço. Nesse contexto, objetivou-se com este estudo quantificar o padrão de distribuição dos atributos químicos e físicos do solo e como esse padrão se relaciona com a variação topográfica do terreno em um fragmento de Floresta Atlântica no sul do Espírito Santo. O estudo foi realizado no Parque Estadual Mata das Flores, município de Castelo, Espírito Santo, Brasil. As parcelas foram alocadas em um transecto de 750 metros ao longo de gradiente topográfico que varia de 100 m a 180 m de altitude, dispostas em pares distantes 10 metros entre si e a distância entre os pares variando de 20 a 25 m. Cada parcela amostrada foi classificada quanto a sua posição no relevo: baixada, encosta e topo. Realizou-se a caracterização química e física do solo nas profundidades 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m. O solo da baixada apresentou maiores teores de bases trocáveis (Ca, Mg, Na, K), P e teor de Areia Fina. Em contrapartida, o solo do topo apresentou maior acidez potencial (H+Al), menos nutrientes disponíveis, e maiores teores de argila. As parcelas da encosta apresentaram condição intermediária entre o topo e a baixada no Domínio Morfoclimático Mar de Morros no bioma Floresta Atlântica da região Sudeste. A declividade e a elevação do terreno condicionaram a heterogeneidade química e física dos atributos do solo na topossequência de floresta em regeneração no bioma Floresta Atlântica do Sudeste.

Palavras-chave: Topografia. Relação solo-paisagem. Atributos químicos do solo. Atributos físicos do solo. Análise de componentes principais.

CHAPTER 1

ATTRIBUTES PHYSICAL AND CHEMICAL SOIL ALONG TOPOGRAPHICAL GRADIENT IN ATLANTIC FOREST FRAGMENT IN THE SOUTH OF ESPÍRITO SANTO

Abstract

The heterogeneity of soil properties depends on the dynamics in the landscape, as well as pedogenic processes. The combination of these factors can influence the growth of plants and their distribution in different scales over time and space. In this context, the aim of this study was to quantify the distribution pattern of the chemical and physical soil properties and how this pattern relates to the topographical variation of the ground in a fragment of Atlantic Forest in the south of the Espírito Santo. The study was conducted in the Mata das Flores State Park, Castelo municipality, Espírito Santo, Brazil. The plots were allocated in a transect of 750 meters along the topographic gradient ranging from 100 meters to 180 meters, arranged in pairs 10 meters distant from each other and the distance between the pairs ranging from 20 to 25 meters. Each sampled portion was classified by its position in the landscape: lowered, side and top. There was the chemical and physical soil depths from 0.0 to 0.10 and 0.10-0.20 m lowered soil showed higher levels of exchangeable bases (Ca, Mg, Na, K), P and Fine Sand content. By contrast, the top soil had greater potential acidity (H+Al), fewer nutrients available, and higher clay content. The side of the plots showed intermediate condition between the top and lowered in the Morphoclimatic feature of Mar de Morros in the Atlantic Forest in the Southeast. The slope and elevation of the land have conditioned the chemical and physical heterogeneity of soil properties in regenerating forest toposequence in the Atlantic Forest Southeast.

Keywords: Topography. Soil-landscape relationship. Soil chemical properties. Soil physical properties. Principal component analysis.

1. INTRODUÇÃO

A Floresta Atlântica é considerada uma das áreas mais ricas em biodiversidade e mais ameaçadas do planeta. Atualmente, restam 8,5 % de remanescentes florestais acima de 100 hectares da cobertura original (1.315.460 km²) em território brasileiro (SOS MATA ATLÂNTICA, 2015). No Estado do Espírito Santo, restam aproximadamente 10,5% da vegetação original desse bioma (INPE, 2015).

A diversidade fitofisionômica das Florestas Tropicais pode emergir em diferentes escalas, por exemplo, em função de variações climáticas, topografia, material de origem, química do solo, suscetibilidade à erosão e tempo (ALMEIDA et al., 2015; BALDECK et al., 2012; CARMO; JACOBI, 2015; CORINGA et al., 2012; ROVEDDER et al., 2014; SANTOS et al. 2010; SCIPIONI et al., 2012; TOWESEND; ASNER; CLEVELAND, 2008).

A topografia é considerada a variável mais importante na distribuição espacial e na estrutura das florestas tropicais (RODRIGUES et al., 2007; WERNER; HOMEIER, 2015; WILCKE et al., 2008), modificando as condições de drenagem e propriedades dos solos, por exemplo, estrutura, porosidade, densidade do solo e teor de nutrientes (CAMPOS et al., 2012). Em consequência, podem-se criar condições limitantes de nutrientes capazes de afetar o crescimento das espécies vegetais e sua distribuição em diferentes escalas ao longo do tempo e espaço (CAMPOS et al., 2010; DUBUIS et al., 2013; FRANZEN et al.; 2006; TOLEDO et al., 2009; TOWNSEND et al., 2008; WERNER; HOMEIER, 2015).

Na região Sudeste, o Domínio Morfoclimático que se destaca é o denominado Mar de Morros, este envolve a maior parte do Espírito Santo (AB'SABER, 1996). Os Latossolos abrangem aproximadamente 56% da região Sudeste e somados aos Argissolos, perfazem cerca de 78% desta importante região brasileira (COELHO et al., 2002).

Os solos dos Mares de Morros geralmente apresentam baixa fertilidade natural, tendendo a distróficos e álicos, comumente, em razão do profundo manto de intemperismo, com inexpressiva quantidade de minerais primários facilmente intemperizáveis e relevo acidentado, tornando-os vulneráveis quanto às perdas de nutrientes por erosão e lixiviação (REZENDE; RESENDE, 1996). Nesse contexto, incluem solos com baixa disponibilidade dos macronutrientes primários (N, P e K), secundários (Ca, Mg e S), e de micronutrientes (Zn e Cu). Existem também grandes extensões de solos ácidos com baixa CTC e alto poder de

fixação de fósforo, assim como elevada acidez trocável (Al^{3+}) somado ao alto risco de erosão (BERNARDI; MACHADO; SILVA, 2002).

Contudo, o conhecimento sobre a relação solo-vegetação com o padrão de variação topográfica na paisagem de Mar de Morros no Sudeste, e quais variáveis são mais responsivas nesta distribuição ainda são pouco elucidados. Neste contexto, é imprescindível conhecer qual a relação entre os atributos físicos e químicos do solo ao longo do gradiente topográfico dentro de florestas tropicais, particularmente no bioma Floresta Atlântica. Os resultados podem fornecer as bases para entender como os ecossistemas naturais são formados e podem variar no tempo dando luz ao conhecimento de suas funções na evolução dos pedoambientes e como estes devem ser preservados e manejados.

A hipótese deste estudo é que a topografia promove heterogeneidade química e física do solo em topossequências dentro de Florestas Tropicais. Sendo assim, o objetivo deste estudo é quantificar o padrão de distribuição dos atributos químicos e físicos do solo e como esse padrão se relaciona com a variação topográfica num fragmento de Floresta Atlântica no sul do Espírito Santo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado, no ano de 2015, em um fragmento florestal, no Parque Estadual Mata das Flores, localizado nas coordenadas 20°35'54" S e 41°10'53" W, com área aproximada de 800 ha, localizado adjacente à área urbana do município de Castelo, Espírito Santo - Brasil. A precipitação anual no município varia entre 1.500 e 2.000 mm, sendo o clima do tipo subtropical, com verão temperado, sem estação seca (Cfb), de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013).

O Parque situa-se no domínio da Floresta Atlântica (Floresta Ombrófila Densa Montana e Estacional Semidecidual (IBGE, 2004). A área é um dos últimos remanescentes florestais de Floresta Atlântica protegidos da região e é também um corredor ecológico importante adjacente aos Parques Estaduais de Forno Grande e Parque Estadual da Pedra Azul, situados em áreas de maior altitude. No Parque ocorrem algumas espécies como *Cedrela*, *Cássia*, Bromélias e Palmáceas e a fauna é composta por pacas, raposas, preguiças, ouriços e macacos-prego. O entorno imediato do Parque é constituído principalmente por propriedades rurais que cultivam cafeeiros e criam gado (IEMA, 2016).

2.2. Amostragem e coleta de dados

A unidade amostral consistiu de parcela de 10 m x 10 m (0,01 ha). As parcelas foram distribuídas na área do Parque de forma a garantir representatividade quanto aos tipos de ambientes, topografia e extensão da reserva. As parcelas foram alocadas em um transecto de 750 metros ao longo de um gradiente topográfico que varia de 100 m a 180 m de altitude. As parcelas foram dispostas em pares distantes 10 metros entre si e a distância entre os pares variando de 20 m a 25 m. Foram escolhidas por sorteio aleatório 25 parcelas para as coletas de amostras de solo.

As coordenadas geográficas referentes ao centro de cada parcela foram detectadas com auxílio de GPS (*Garmin International, Inc., Kansas City, USA*). Os atributos topográficos (cota altimétrica, elevação, curvatura, face de exposição, incidência solar e índice de posição topográfica) foram extraídas de um raster SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de banda única com resolução espacial de 30 m (1 arco segundo) utilizando-se ferramentas disponíveis no programa ArcGIS versão 10.3 (ESRI, 2015). A declividade do terreno foi medida em campo por meio de clinômetro. Cada parcela amostrada foi classificada quanto a sua posição no relevo: baixada, encosta e topo (Tabela 1).

Para descrição dos solos, primeiramente foi realizada a estratificação por meio de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e seus produtos (declive, curvatura, aspecto e altitude) para delimitarem-se os locais representativos das classes. Procedeu-se a coleta de amostra de solo na profundidade de 0,60-0,80 m com auxílio de um trado holandês de forma a caracterizar química e fisicamente essa camada em cada parcela, esta foi caracterizada e coletada conforme SANTOS et al. (2013a), posteriormente os solos foram descritos segundo SiBCS (SANTOS et al., 2013b). A coleta de solo para a caracterização química e física foi realizada em fevereiro de 2015, por meio da abertura de pequenas trincheiras de 0,20 m de profundidade em cada parcela, retirando-se, com auxílio de uma espátula, amostras de solo superficial (aproximadamente 300 g cada) com 3 repetições, nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m. Posteriormente as amostras foram conduzidas ao Laboratório de Solos do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES).

Tabela 1 - Descrição geral das parcelas de coleta das amostras de solo em Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil

Parcelas	Latitude	Longitude	Elevação (m)	Declividade* (%)	Relevo	OP ¹	Posição Topográfica
P15	20°36'44,28"S	41°10'06,01"W	117	-	Plano	Sul	Baixada
P15A	20°36'45,20"S	41°10'06,44"W	117	-	Plano	Oeste	Baixada
P14A	20°36'46,09"S	41°10'05,08"W	119	-	Plano	Sudoeste	Baixada
P14B	20°36'46,76"S	41°10'04,27"W	122	-	Plano	Sudoeste	Baixada
P13	20°36'47,20"S	41°10'02,66"W	126	27	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P13C	20°36'48,25"S	41°10'02,66"W	123	16	Ondulado	Oeste	Baixada
P12B	20°36'48,85"S	41°10'00,24"W	134	21	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P12C	20°36'49,24"S	41°10'00,60"W	128	31	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P11A	20°36'49,64"S	41°10'00,31"W	128	21	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P11B	20°36'49,58"S	41°09'59,03"W	143	22	Forte Ondulado	Oeste	Encosta
P11D	20°36'50,67"S	41°09'57,35"W	149	27	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P10	20°36'51,38"S	41°09'56,44"W	142	27	Forte Ondulado	Sul	Encosta
P10C	20°36'52,80"S	41°09'55,79"W	136	29	Forte Ondulado	Sul	Encosta
P9B	20°36'53,63"S	41°09'54,45"W	125	32	Forte Ondulado	Sul	Encosta
P9C	20°36'53,87"S	41°09'55,22"W	125	36	Forte Ondulado	Sul	Encosta
P8A	20°36'54,52"S	41°09'54,11"W	118	-	Plano	Sul	Baixada
P8C	20°36'54,86"S	41°09'53,51"W	118	-	Plano	Noroeste	Baixada
P7	20°36'55,28"S	41°09'51,48"W	137	29	Forte Ondulado	Noroeste	Encosta
P7A	20°36'55,73"S	41°09'52,13"W	137	28	Forte Ondulado	Oeste	Encosta
P6A	20°36'56,86"S	41°09'50,21"W	149	25	Forte Ondulado	Noroeste	Topo
P6B	20°36'56,55"S	41°09'49,00"W	171	23	Forte Ondulado	Noroeste	Topo
P6D	20°36'57,24"S	41°09'48,25"W	171	15	Ondulado	Oeste	Topo
P5A	20°36'59,19"S	41°09'47,63"W	173	7	Suave Ondulado	Sul	Topo
P5B	20°36'59,44"S	41°09'46,50"W	161	16	Ondulado	Sudeste	Topo
P4	20°36'59,84"S	41°09'45,55"W	154	24	Forte Ondulado	Sudeste	Topo

¹OP = Orientação da parcela. * Valores não medidos em campo (< 3%).

As amostras coletadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com malha de 2,0 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar – TFSA. Para determinação da densidade do solo e porosidade total foram coletadas 3 amostras indeformadas de solo na profundidade de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m, em cada parcela, utilizando-se cilindros metálicos de Koppec (anel volumétrico) de dimensões conhecidas com auxílio de amostrador de Uhland. A coleta do solo foi realizada no mês de fevereiro de 2015.

2.3. Atributos químicos do solo

A caracterização química do solo foi realizada nas amostras de TFSA coletadas nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m. Foram determinados o pH em água (relação 1:2,5); Acidez Potencial ($H^+ + Al^{3+}$) extraída com solução de acetato de cálcio $Ca(OAc)_2$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ajustada a pH 7,0 e determinada por titulação com NaOH ($0,025 \text{ mol L}^{-1}$); K e Na trocáveis: extrator Mehlich⁻¹ e determinação por espectrofotometria de chama; P disponível: extrator Mehlich⁻¹ e determinação por colorimetria; Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e determinação por titulometria (Al^{3+}) alcalina (NaOH, $0,025 \text{ mol L}^{-1}$) e espectrometria de absorção atômica (Ca^{2+} , Mg^{2+}) conforme descrito em Embrapa (2011).

De posse dos resultados das análises químicas foram calculadas as somas de bases (SB), a saturação por bases (V%) e por alumínio (m). A capacidade de troca catiônica efetiva (t) foi calculada pela soma dos cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ e Al^{3+}) e a capacidade de troca catiônica total (CTC pH 7,0) estimada pela soma de bases (SB) e acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$). O carbono orgânico total (COT) foi quantificado por oxidação da matéria orgânica por via úmida com dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$ $0,167 \text{ mol L}^{-1}$) em meio sulfúrico, com aquecimento externo e determinado por titulometria com sulfato ferroso amoniacal, conforme descrito por Mendonça e Matos (2005). A caracterização química e física das amostras coletadas na profundidade de 0,60-0,80 m foi realizada segundo Embrapa (2011).

2.4. Atributos físicos do solo

A análise granulométrica foi realizada nas amostras de TFSA nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m por agitação lenta a 50 rpm por 16 horas, com agitador tipo Wagner e presença de dispersante químico NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e determinação das frações silte e argila pelo método da pipeta (ALMEIDA et al., 2012). A relação Silte/Argila foi determinada de acordo com Embrapa (2011). Para a determinação da argila dispersa em água (ADA), utilizou-se também a agitação lenta a 50 rpm, sem presença de dispersante químico (NaOH, $0,1 \text{ mol L}^{-1}$),

e a partir da ADA e argila total foi calculado o grau de flocculação (GF) (EMBRAPA, 2011). A densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método do anel volumétrico, oriunda de três amostras simples nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m, obtida pela razão entre a massa de cada amostra de solo seco a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ e o volume de cada anel acoplado ao amostrador de Uhlund. A densidade de partículas do solo (D_p) foi avaliada pelo método do balão volumétrico, utilizando-se 3 amostras deformadas de solo, em cada parcela, nas profundidades 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m. A Porosidade total foi calculada pela diferença $(1 - D_s/D_p)$ a partir dos dados da densidade do solo (D_s) e densidade de partícula (D_p). Para determinação da macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) foi utilizada a mesa de tensão, conforme descrito em EMBRAPA (2011).

2.5. Análise estatística dos dados

Para identificar o padrão de distribuição dos atributos químicos e físicos dos solos ao longo do gradiente topográfico, foram utilizados dois métodos de ordenação: análise de componentes principais (ACP) e análise de Redundância (RDA) (do termo em inglês *redundance analysis*). Inicialmente, o coeficiente de correlação de Pearson (r) foi utilizado para detectar colinearidade entre as variáveis quantitativas; de modo que o valor de r esteve sempre entre -1 e +1, com $r = 0$ correspondendo a não associação absoluta. Quanto mais próximo de 1 ou -1, mais forte é a associação entre duas variáveis. O coeficiente de correlação atuou como ferramenta auxiliar na seleção das variáveis (atributos físicos e químicos), dentro da comparação de cada conjunto de dados, na análise de componentes principais. Os atributos Ca, P, K e Mg apresentaram colinearidade, entretanto foram mantidos na análise dada sua importância nas características edáficas da área de estudo. Dentre os objetivos da ACP estão: redução da dimensionalidade dos dados e a identificação de padrões dos dados ao longo de eixos ortogonais. Posteriormente, uma matriz de dados com variáveis topográficas foi utilizada como preditora dos atributos químicos e físicos do solo em uma análise de redundância - RDA (LEGENDRE; LEGENDRE, 2012).

Todas as análises multivariadas foram realizadas após a padronização das variáveis onde cada dado foi subtraído pela média e dividido pelo desvio padrão, ao final, cada variável ficou com média igual a zero e variância igual a 1. As variáveis contidas na matriz topográfica foram derivadas do raster SRTM de resolução espacial de 30 m, exceto declividade medida em campo por clinômetro. Estas variáveis são amplamente utilizadas em estudos ecológicos, seguindo os mesmos procedimentos de extração dos dados e de transformação dos mesmos.

No entanto, a redundância entre algumas variáveis confunde a visualização e adiciona um viés na estimativa do R^2 devido à multicolinearidade entre as variáveis. O VIF (fator de inflação da variância) é a ferramenta diagnóstica para esse viés. As variáveis preditoras não colineares devem apresentar VIF abaixo de 10; próximos de 1 são ideais (BORCARD; GILLET; LEGENDRE, 2011). A análise estatística dos dados foi realizada utilizando o software R (R CORE TEAM, 2015), com auxílio dos pacotes Vegan (OKSANEN et al., 2016) e Packfor (DRAY; BLANCHET; LEGENDRE, 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A média e o erro-padrão dos atributos químicos e físicos das amostras de solo coletadas na profundidade de 0,60-0,80 m na baixada, encosta e topo encontram-se na Figura 1. O material de origem desses solos constitui-se de rochas de composição química variada, compostas basicamente de quartzo, feldspatos, plagioclásios e biotita (CPRM, 2015). Os atributos dos solos que ocorrem nesta topossequência apresentaram forte relação com a variação do relevo, sendo este um fator determinante na drenagem e no nível do lençol freático da área.

Nas parcelas da baixada, exceto na P13C, os solos apresentam processo de gleização, com ocorrência ou não de mosqueados pouco abundantes dentro de 0,60 m a partir da superfície. A presença de gleização e mosqueados nesses ambientes indica efeito de flutuação do lençol freático e condições anaeróbicas alternadas com condições de oxidação. O acúmulo de água, permanente ou periódico, retarda o desenvolvimento pedogenético, predominando o processo de gleização (CAMPOS et al., 2012). Os solos da baixada foram classificados como Gleissolos. As parcelas da baixada estiveram associadas aos maiores teores de areia ($554,29 \pm 41,11 \text{ g kg}^{-1}$) e o topo apresentou maiores teores de argila ($610,00 \pm 28,05 \text{ g kg}^{-1}$) (Figura 1). O solo da P13C apresentou textura média em superfície e muito argilosa dentro de 0,60 m a partir da superfície, com nítida mobilização de argila da parte mais superficial do solo, característico de um Argissolo Vermelho-Amarelo.

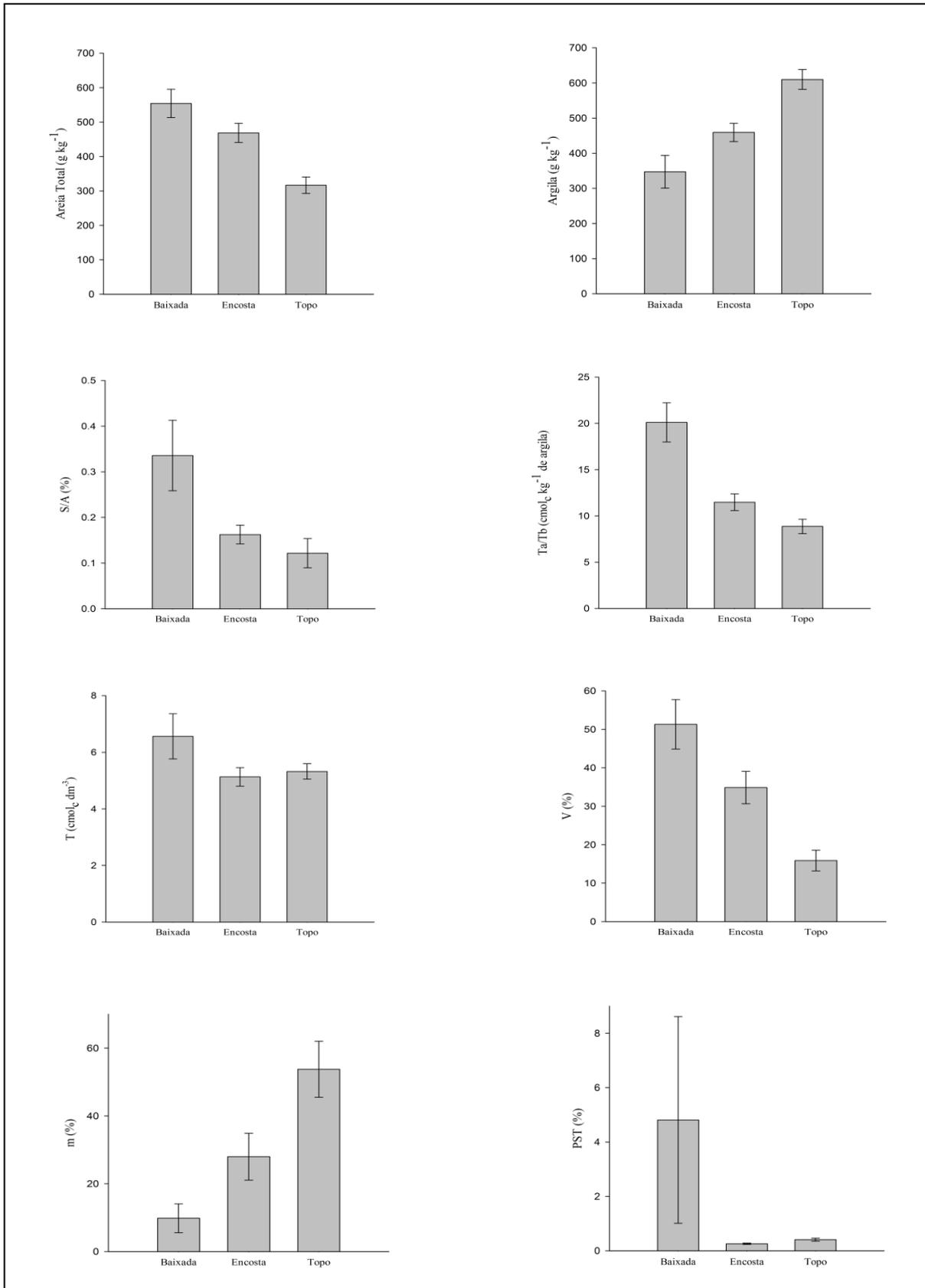


Figura 1 – Caracterização química e física das amostras de solo coletadas na profundidade de 0,60-0,80 m em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil. S/A = relação Silte/Argila; Ta/Tb = atividade da fração argila; T = CTC a pH 7,0; V = saturação por bases; m = saturação por alumínio; PST = porcentagem de sódio trocável.

Em P8A, sob solo em fundo de vale não foi verificada transição textural. A parcela P8C, localizada muito próxima ao curso d'água, apresentou horizonte glei e percentual de sódio trocável de 27,50%, indicando alta sodicidade ($PST > 15\%$). O acúmulo natural de sais neste ambiente pode ser explicado pela dinâmica do lençol freático e, pode apresentar grande variabilidade em função da deposição de sedimentos (FERNANDES et al., 2007). Vale observar o aumento da CTC dos gleissolos ($6,56 \pm 0,80 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), uma vez que o ambiente de sua formação propicia acúmulo de bases trocáveis ($51,30 \pm 6,44\%$) (Figura 1) e sílica conforme discutido por Coringa et al. (2012). Os solos das parcelas localizadas na encosta, exceto P9B, P7 e P7A, apresentam mobilização de argila da parte mais superficial do solo (B/A igual ou maior que 1,5), com acúmulo na camada subsuperficial (0,60-0,80 m), com o horizonte B próximo a superfície, além disso, há baixa atividade da fração argila, sem rochosidade a rochosidade média, com indícios de escoamento superficial na parcela P11D, podendo ser agrupados na classe Argissolo Vermelho-Amarelo. Nos Argissolos, a textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt, sempre ocorrendo translocação de argila (SANTOS et al., 2013b). Nas parcelas P9B, P7 e P7A localizadas na encosta, não foi verificada translocação de argila entre as camadas, indicando material de origem diferente (rochas máficas associadas à baixa presença de argilominerais), podendo pertencerem à classe dos Latossolos Vermelho-Amarelos. As parcelas localizadas no topo apresentam solo com pouca diferença textural entre as camadas superficiais e subsuperficial, com predomínio da fração argila ($610,00 \pm 28,05 \text{ g kg}^{-1}$) na profundidade de 0,60-0,80 m, distróficos ($V < 50\%$), sugerindo pertencer à classe dos Latossolos Vermelho-Amarelos. As parcelas do topo apresentaram menores valores para V e maiores valores de m ($15,87 \pm 2,68\%$ e $53,77 \pm 8,26\%$, respectivamente). Foi verificado durante as coletas de solo que as cores avermelhadas (avaliação visual) nos solos mostraram-se dominantes nas posições mais altas, indicando melhor drenagem desses ambientes e solo formado a partir do intemperismo de rocha máfica. Todos os solos avaliados apresentaram argila de atividade baixa (Tb) ($< 27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ argila) e baixa relação silte/argila ($< 0,7$ para solos de textura média e $< 0,6$ para solos de textura argilosa ou muito argilosa) indicando intemperismo acentuado nos ambientes estudados (Figura 1). De acordo com Martins et al. (2006), quanto maior o grau de encharcamento do solo, mais impróprio torna-se o ambiente para o desenvolvimento e crescimento vegetal, ocorrendo, dessa forma, substituição de indivíduos arbóreos por indivíduos herbáceos, que se propagam de pontos mais altos (melhor drenagem) para áreas mais baixas (drenagem deficiente).

A média e o erro-padrão dos atributos químicos e físicos dos solos na profundidade de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m na baixada, encosta e topo utilizados na análise de componentes principais encontram-se na Figura 2 e 3, respectivamente.

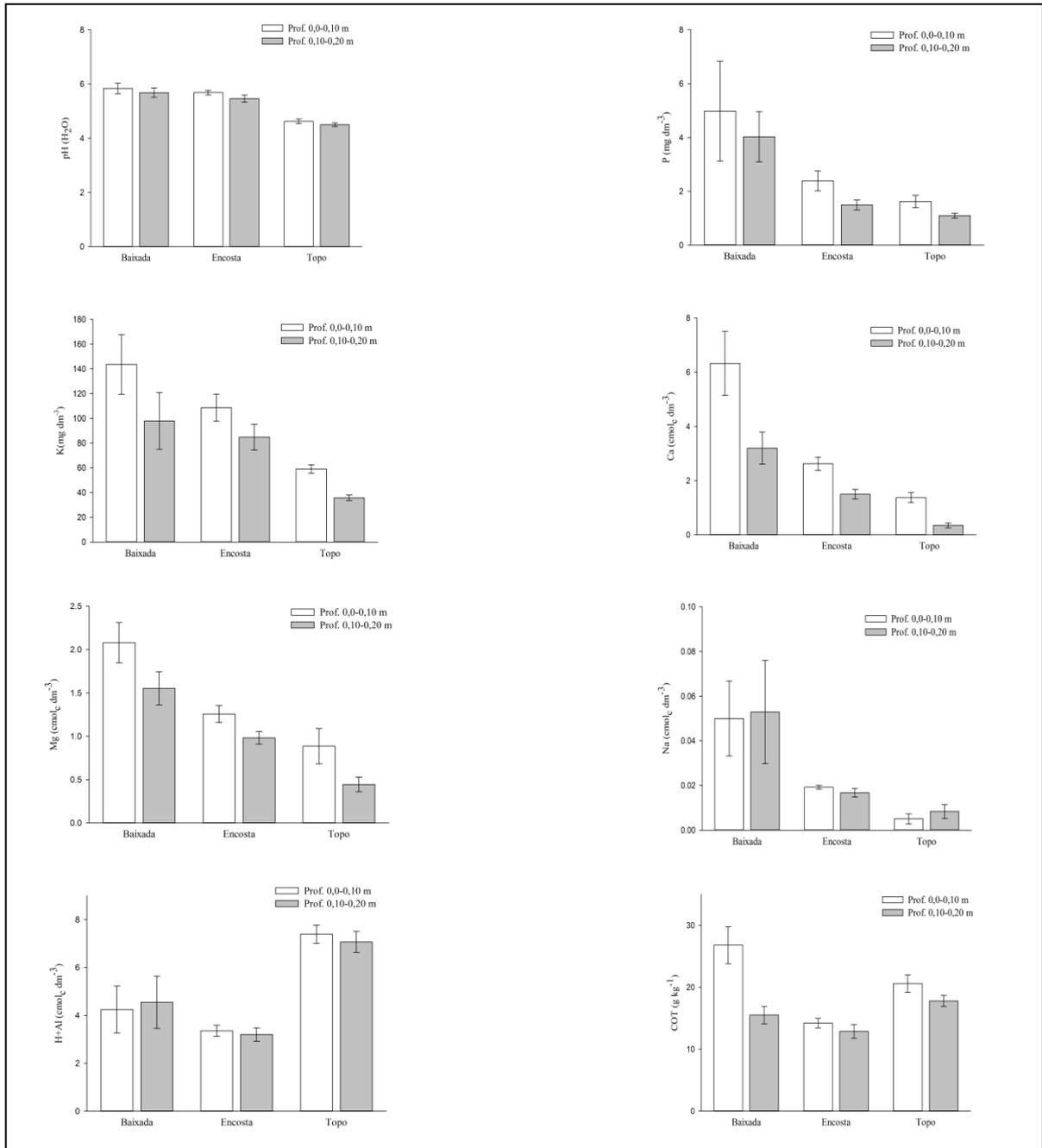


Figura 2 - Média e erro-padrão dos atributos químicos do solo na profundidade de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil. pH = pH em H₂O; P = fósforo disponível; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Na = sódio; H+Al = acidez potencial; COT = carbono orgânico total.

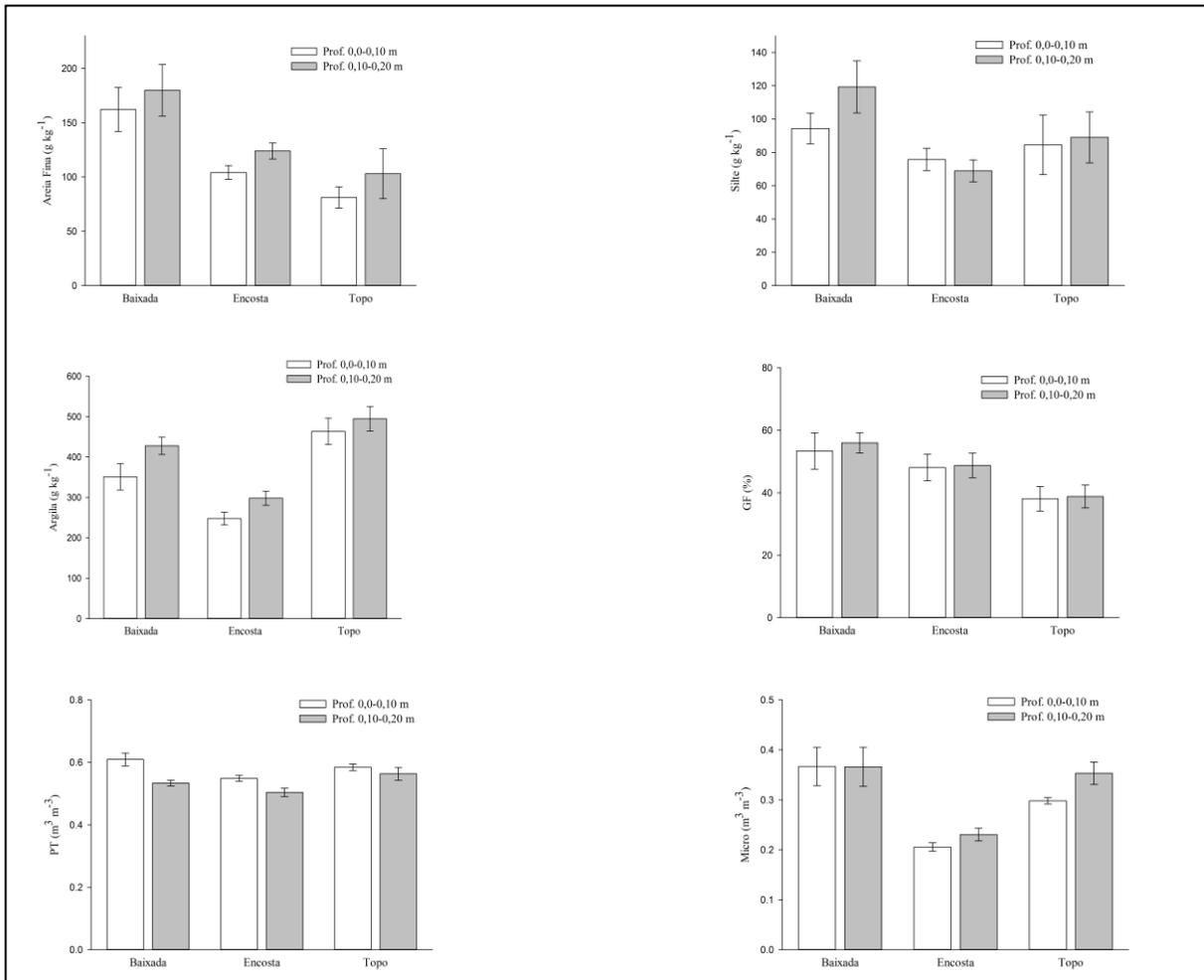


Figura 3 - Média e erro-padrão dos atributos físicos do solo na profundidade de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil. GF = grau de floculação; PT = porosidade total; Micro = microporosidade.

Na análise de componentes principais foi utilizado o conjunto dos atributos físicos e químicos nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, considerando os três primeiros eixos fatoriais – CP1, CP2 e CP3 (Tabela 2). A profundidade 0,0-0,10 m apresentou, nos componentes CP1, CP2 e CP3, variância que explica 72,53% da variabilidade total dos atributos químicos e físicos do solo, sendo 40,20 %; 22,13 %; e 10,20 % pelo 1º, 2º e 3º eixos, respectivamente (Tabela 2). Em relação à profundidade de 0,10-0,20 m, os três primeiros eixos apresentaram variância explicando 74,06 % da variabilidade total dos dados, com 33,75 % para o CP1; 28,76 % para o CP2 e 11,55 % para o CP3 (Tabela 2).

Na profundidade de 0,0-0,10 m, houve alta correlação negativa entre o CP1 e as variáveis Ca, K, Mg, pH e P. A fração Areia Fina apresentou correlação negativa com o CP1 (Tabela 2). Os maiores teores de bases trocáveis estiveram associados à baixada (Figura 2).

Tabela 2 - Componentes principais (CP_i), autovalores (λ_i), variância explicada pelos componentes principais e correlação (1) entre variáveis originais e componentes principais na profundidade de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m

Atributos do solo	Componente principal			Componente principal		
	Profundidade de 0,0-0,10 m			Profundidade de 0,10-0,20 m		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
<i>Autovalor (λ_i)</i>	5,62	3,09	1,42	4,72	4,02	1,61
<i>Variância exp. (%)</i>	40,20	22,13	10,20	33,75	28,76	11,55
pH	-0,71	-0,61	0,11	-0,82	0,43	-0,02
P	-0,70	0,07	-0,26	<u>-0,61</u>	-0,54	-0,40
K	-0,87	-0,30	-0,09	-0,78	0,22	0,40
Na	-0,37	0,35	0,73	-0,39	-0,61	-0,43
Ca	-0,96	0,04	-0,13	-0,92	0,007	0,17
Mg	-0,87	0,07	0,21	-0,91	-0,08	0,13
H+Al	0,51	0,78	0,09	0,45	-0,77	-0,18
COT	-0,65	0,65	-0,05	0,04	-0,60	0,63
Areia Fina	<u>-0,66</u>	0,03	0,33	<u>-0,65</u>	-0,29	0,14
Silte	-0,40	0,06	-0,39	-0,43	-0,68	-0,19
Argila	0,08	<u>0,63</u>	-0,57	0,27	-0,71	-0,17
GF	-0,48	-0,47	-0,33	-0,43	0,14	-0,47
PT	-0,38	0,50	-0,03	0,24	-0,53	0,47
Micro	-0,58	0,73	-0,01	-0,20	-0,86	0,25

¹Correlações > 0,7 – forte; correlação < 0,7 e > 0,5 – fraca; pH = em H₂O; P = fósforo; K = potássio; Na = sódio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; H+Al = acidez potencial; GF = grau de floculação; PT = porosidade total; Micro = microporosidade.

Isso pode explicar os minerais da fração areia como fonte de nutrientes no solo e, ou processo de movimentação lateral de nutrientes por escoamento superficial. Comportamento similar foi verificado na profundidade de 0,10-0,20 m, onde as bases trocáveis do solo (Ca, Mg e K) e o pH apresentaram alta correlação negativa com CP1, de maior variância. A fração areia fina novamente apresentou correlação negativa com o CP1, sugerindo ser fonte adicional destas bases no solo (Tabela 2).

O segundo componente principal (CP2) teve maior correlação com a acidez potencial (H+Al) e microporosidade para explicar a variabilidade dos dados na profundidade de 0,0-0,10 m (Tabela 2), enquanto que a acidez potencial, o teor de argila e a microporosidade apresentaram maior correlação negativa com o CP2 na profundidade de 0,10-0,20 m. O maior teor de acidez potencial e argila está associado às parcelas do topo em 0-0,10 m ($7,39 \pm 0,38$

cmol_c dm⁻³ e 463,66 ± 32,58 g kg⁻¹, respectivamente) e 0,10-0,20 m (7,07 ± 0,45 cmol_c dm⁻³ e 494,63 ± 30,20 g kg⁻¹, respectivamente) (Figura 2 e 3). Solos de elevada acidez podem favorecer a dispersão de caulinita pela ação de ânions orgânicos (geração de cargas e repulsão), produzidos pela decomposição da matéria orgânica e por exsudados de raízes (ALLEONI; CAMARGO, 1994; OADES, 1984,). Os altos teores da fração argila e maior acidez do solo no topo podem ser atribuídos em consequência da maior lixiviação, promovida pelo regime hídrico associado às melhores condições de drenagem nos topos conforme discutido por Campos et al. (2010) ao estudarem interferências de pedoambientes nos atributos do solo de toposequência de transição Campos/Floresta na região de Humaitá, AM.

O terceiro componente principal (CP3) apresentou maior correlação com o teor de Na em 0,0-0,10 m. Os teores de Na em 0,0-0,10 m foram de 11,76 ± 3,77 cmol_c dm⁻³ (Figura 2), que deve estar ligado ao efeito de flutuação de nível do lençol freático e a variabilidade em função da deposição de sedimentos (SANTOS et al., 2010), isso promoveu maior incremento na parcela P8C. Na profundidade 0,10-0,20 m, os atributos do solo apresentaram baixa correlação com PC3, sendo estes, menos importantes na variabilidade dos dados em 0,10-0,20 m (Tabela 2).

Os maiores teores de areia fina e silte (162,17 ± 20,24 g kg⁻¹ e 94,38 ± 9,24 g kg⁻¹, respectivamente) em 0-0,10 m e (179,81 ± 23,66 g kg⁻¹ e 119,27 ± 15,60 g kg⁻¹, respectivamente) em 0,10-0,20 m estão associados à baixada (Figura 3). Os minerais primários, fontes de K, como feldspatos e micas, na maioria dos solos brasileiros pertencem às frações areia e silte (KAMPF; CURI; MARQUES, 2009). A presença de minerais primários pode ser considerada como reserva de nutrientes no solo (CASTRO et al., 2010). Outros autores ressaltaram a importância das frações silte e areia do solo como fontes de bases (MELO et al., 2004, SEYBOLD; McCALLISTER, 1990). Seybold e McCallister (1990), ao estudarem a cinética e os mecanismos de liberação de K em solos arenosos, verificaram que grande parte da liberação de K na solução do solo ocorreu na fração areia, rica em ortoclásio com avançado grau de intemperismo. Ainda de acordo com Melo et al. (2000), mesmo em quantidade reduzida, os minerais micáceos são responsáveis pelos teores de K e Mg, normalmente encontrados na fração areia de solos intemperizados. Segundo Melo et al. (2004), os solos com teores totais elevados de K e Mg na fração areia de solos tropicais, comumente, apresentam maior capacidade de liberação de parte desses nutrientes para a solução do solo, atribuída à maior presença de minerais primários fonte de nutrientes.

Os teores de P disponível foram baixos em todas as situações estudadas (Figura 2). Os maiores teores de P disponível nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m, estão associados às parcelas da baixada ($4,98 \pm 1,86 \text{ mg dm}^{-3}$ e $4,02 \pm 0,93 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente) e os menores teores às parcelas do topo ($1,62 \pm 0,23 \text{ mg dm}^{-3}$ e $1,09 \pm 0,09 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente). Esses resultados podem ser explicados pelo efeito de minerais mais oxídicos no topo (Fe e Al), que podem formar compostos estáveis de baixa solubilidade e mobilidade (MELO; PEREZ, 2009). Além disso, os teores de P disponível decresceram em profundidade nos diferentes solos. Isso ocorreu, principalmente, pelo maior aporte de matéria orgânica ocorrer em superfície reduzindo os sítios de adsorção de P no solo e aumentando sua disponibilidade em superfície. Esses resultados corroboram com Silva, Silva Junior e Melo (2006) e Campos et al. (2012), que verificaram que o P apresenta tendência decrescente em profundidade, podendo refletir a pouca mobilidade e a baixa solubilidade de seus compostos, sobretudo em solos de natureza ácida, com elevados teores de óxidos de ferro e alumínio.

A microporosidade apresentou maiores valores no solo da baixada ($0,37 \pm 0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) na profundidade de 0,0-0,10 m, e na profundidade de 0,10-0,20 m ($0,37 \pm 0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Figura 3). Nenhuma área apresentou porosidade inferior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, que é a porosidade restritiva para o bom desenvolvimento radicular (GRABLE; SIEMER, 1968). O aumento da fração areia fina e silte nas parcelas da baixada em decorrência da posição rebaixada no relevo, promoveu aumento do percentual de microporos associados à compactação neste ambiente. Segundo Rosolen e Herpin (2008), a ocorrência de depressões topográficas na paisagem podem alterar propriedades do solo como a estrutura e textura, bem como, favorecerem a deposição de sedimentos finos nas posições rebaixadas.

Conforme indicado na análise de componentes principais, as parcelas localizadas na baixada são relativamente mais férteis, associadas aos maiores teores de bases trocáveis (Ca, Mg, K), P, teor de areia e maior pH (Figura 4, a e b). Em contrapartida, as parcelas do topo estão associadas a solo mais ácido, mais pobre em bases, com baixo pH e maior teor de argila (Figura 4, a e b), enquanto as parcelas da encosta apresentam condição intermediária entre o topo e a baixada. Resultados semelhantes foram encontrados por Martins et al. (2003) que identificaram alterações nas propriedades físicas e químicas do solo ao longo de gradiente topográfico num fragmento de Floresta Estacional Semidecidual em Viçosa - MG, sendo o solo da baixada mais arenoso, mais fértil e menos ácido, em comparação ao solo do topo, mais argiloso, com teores muito baixos de macronutrientes e elevada acidez, e a encosta apresentando condições edáficas intermediárias.

desagregação do solo torna-o susceptível a erosão. A composição química das rochas e o relevo afeta diretamente os estoques de nutrientes no solo (PULLA et al., 2016).

A Análise de Redundância dos atributos químicos e físicos em 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m foi realizada com o objetivo de identificar as variáveis topográficas predictoras dos padrões de distribuições de atributos químicos e físicos do solo. Na primeira análise, todas as variáveis topográficas (elevação, declividade, seno de aspecto, cosseno de aspecto, curvatura do terreno, incidência solar direta, índice de posição topográfica) foram incluídas. O teste estatístico foi feito por meio da ANOVA. Na primeira rodada o modelo foi significativo, mas o VIF revelou multicolinearidade das variáveis topográficas. Procedeu-se à seleção de variáveis, seguindo o método de Blanchet, Legendre e Borcard (2008). As variáveis selecionadas foram elevação e declividade, as quais foram significativas ($p = 0,001$) e maximizaram o R^2 ajustado = 0,35 para a profundidade 0,0-0,10 m, bem como verificado para a profundidade de 0,10-0,20 m (R^2 ajustado = 0,34 e $p = 0,001$).

De forma geral, a profundidade 0,0-0,10 m apresentou, nos dois primeiros eixos, uma variância que explica 40,84 % da variabilidade total dos dados, sendo 27,58 % e 13,26 % em RDA1 e RDA2, respectivamente (Figura 5, a). Na profundidade 0,10-0,20 m, os dois primeiros eixos apresentaram uma variância que explica 40,05 % da variabilidade total dos dados, com 24,05 % para o RDA1, e 16% para o RDA2 (Figura 5, b).

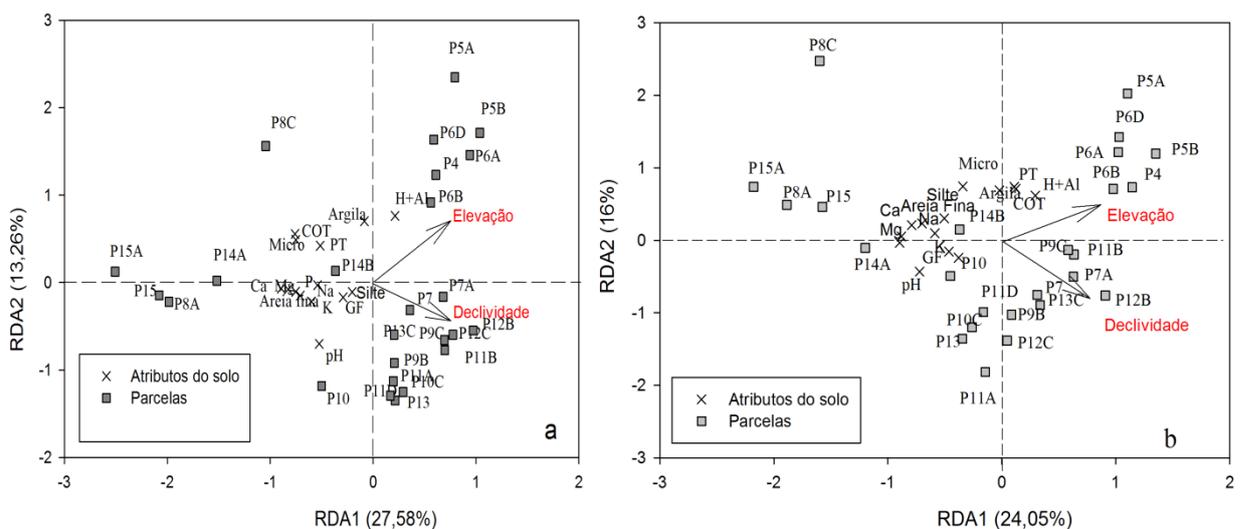


Figura 5 - Análise de redundância dos valores médios dos atributos químicos e físicos do solo para a profundidade (a) 0,0-0,10 m e (b) 0,10-0,20 m e variáveis topográficas, em área de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil.

A ordenação das parcelas, nos dois primeiros componentes da RDA, indica que o gradiente de atributos químicos e físicos foi bem explicado pela elevação e pela declividade, sugerindo esses fatores como condicionantes na distribuição dos atributos químicos e físicos na topossequência. Os solos das parcelas da baixada apresentaram maior fertilidade natural, sendo estes atributos associados à ambiente de menor declividade. Enquanto os solos das parcelas de topo de morro, associados à área de maior elevação apresentaram-se mais ácidos.

Os resultados sugerem que quanto maior a elevação, menor é a quantidade de nutrientes e mais ácidos se tornam os solos, em razão da constante lixiviação de bases, com redução na disponibilidade de nutrientes para as plantas. Em contrapartida, quanto menor o declive do terreno, maior é a fertilidade química e estabilidade do solo, em razão da menor vulnerabilidade à ação da água. De acordo com Fujii et al. (2011), os nutrientes do solo estão constantemente sendo lixiviados das encostas superiores e, em parte, interceptados em sua passagem pelas encostas mais baixas, por exemplo, pelas raízes e superfícies das argilas. Tal gradiente pode ser observado na ordenação das parcelas na análise de componentes principais (Figura 4, a e b).

Segundo o modelo conceitual proposto por Werner e Homeier (2015) que descrevem a origem e manutenção da heterogeneidade de habitats ao longo de gradientes topográficos em Florestas Tropicais, os processos de lixiviação de nutrientes e perdas de solo causam a perda de nutrientes das posições mais altas do relevo e ajudam a manter a alta concentração de nutrientes do solo nas posições mais baixas. Como a disponibilidade de nutrientes nas posições altas diminui com o tempo, isso força a dominância de espécies de crescimento lento resistentes a forte concorrência por nutrientes nesse ambiente, tornando-as mais competitivas e ao mesmo tempo, espécies adaptadas à concorrência por luz deslocam-se para ambientes de menor declive (GRIME, 1977).

4. CONCLUSÕES

O solo da baixada apresentou maiores teores de bases trocáveis (Ca, Mg, Na, K), P e teor de Areia Fina. Em contrapartida, o solo do topo apresentou maior acidez potencial (H+Al), menos nutrientes disponíveis, e maiores teores de argila. As parcelas da encosta apresentaram condição intermediária entre o topo e a baixada no Domínio Morfoclimático Mar de Morros no bioma Floresta Atlântica da região Sudeste.

A declividade e a elevação do terreno condicionaram a heterogeneidade química e física dos atributos do solo na topossequência de floresta em regeneração no bioma Floresta Atlântica do Sudeste.

5. REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. Domínios morfoclimáticos e solos do Brasil. In: ALVAREZ, V. H.; FONTES, L. E. F., (Ed.). O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; UFV, 1996. p.1-18.

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Atributos físicos de Latossolos ácricos do norte paulista. **Scientia Agricola**, v. 51, n. 2, p. 321-326, 1994.

ALMEIDA, B. G. et al. Padronização de Métodos para Análise Granulométrica no Brasil. Rio de Janeiro: Embrapa, 2012 (Comunicado técnico 66). 11 p.

ALMEIDA, C. M. et al. Análise de agrupamentos em remanescente de Floresta Estacional Decidual. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 781-789, 2015.

ALVARES, C. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Fast Track, p.1-18, 2013.

BALDECK, C. A. et al. Soil resources and topography shape local tree community structure in tropical forests. **Proceedings of the Royal Society B**, dec. 2012.

BERNARDI, A. C. C.; MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. **Fertilidade do solo e demanda por nutrientes no Brasil**. In: MANZATTO, C. V.; JUNIOR, E. F.; PERES, J. R. R., (Ed.). Uso agrícola dos solos brasileiros. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002, p. 61-77, 174 p.

BLANCHET, F. G.; LEGENDRE, P.; BORCARD, D. Forward selection of explanatory variables. *Ecology*, v. 89, n. 9, p. 2623-2632, 2008.

BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. *Numerical Ecology with R*. Springer, New York, 306 p., 2011.

CAMPOS, M. C. C. et al. Interferências dos pedoambientes nos atributos do solo em uma topossequência de transição Campos/Floresta. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 4, P. 527-535, 2010.

CAMPOS, M. C. C. et al. Topossequência de solos na transição Campos Naturais-Floresta na região de Humaitá, Amazonas. **Acta Amazonica**, v. 42, p. 387-398, 2012.

CARMO, F. F.; JACOBI, C. M. Diversity and plant trait-soil relationships among rock outcrops in the Brazilian Atlantic rainforest. **Plant and Soil**, p. 1-14, 2015.

- CASTRO, P. P. et al. Química e mineralogia de solos cultivados com Eucalipto (*Eucalyptus sp.*). **Sciencia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 645-657, dez. 2010.
- COELHO, M. R. et al. Recurso natural solo. In: MANZATTO, C. V.; JUNIOR, E. F.; PERES, J. R. R., (Ed.). Uso agrícola dos solos brasileiros. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p. 1-11, 174 p.
- CORINGA, E. A. O. et al. Atributos de solos hidromórficos no Pantanal Norte Matogrossense. **Acta Amazônica**, v. 42, n. 1, p. 19-28, 2012.
- CPRM. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS/Serviço Geológico do Brasil. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Espírito Santo: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais/ organizadores, VIEIRA, V. S.; MENEZES, R. G. Belo Horizonte: CPRM, 2015/ 01 mapa geológico, escala 1:400.000 e 01 mapa de recursos minerais, escala 1:400.000 (Série Programa de Geologia do Brasil – PGB, Coleção Mapas Geológicos Estaduais) versão em DVD (no prelo). pg.101-103, 289 p. Disponível em [www.cprm.gov.br/geologia básica](http://www.cprm.gov.br/geologia_basica).
- DUBUIS, A. et al. Improving the prediction of plant species distribution and community composition by adding edaphic to topo-climatic variables. **Journal of Vegetation Science**, v. 24, p. 593–606, 2013.
- DRAY, S., BLANCHET, F. G., LEGENDRE, P. 2013. Packfor: Forward selection with permutation (Canoco p. 46). R package version 0.0-8/r109. <http://R-Forge.R-project.org/projects/sedar>
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solos / organizadores, Guilherme Kangussú Donagema... [et al.]. — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. - (Documentos / Embrapa Solos).
- ESRI. ArcGIS for Windows Version 10.3. Licence type ArcInfo. [S.I]: ESRI – Environmental Systems Research Institute, 2015.
- FERNANDES, F. A. et al. 2007. Update Map of Soils of the Pantanal lowlands for the Brazilian System of Soil Classification. Comunicado Técnico 61 - Brasília-DF: Embrapa Pantanal, Corumbá-MS, 6 p.
- FUJII, K. et al. Acidification of tropical forest soils derived from serpentine and sedimentary rocks in East Kalimantan, Indonesia. **Geoderma**, v. 160, n. 3, p. 311-323, 2011.
- FRANZEN, D.W.; NANNA, T.; NORVELL, W. A. A survey of soil attributes in North Dakota by landscape position. **Agronomy Journal**, v. 98, n. 4, p. 1015-1022, 2006.
- GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn root. **Soil Science Society of America Journal**, v. 32, p.180-186, 1968.
- GRIME, J. P. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. **The American Naturalist**, v. 111, n. 982, nov./dec., p. 1169-1194, 1977.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. MAPAS DE BIOMAS E DE VEGETAÇÃO. 2004. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>>. Acesso em 02 de março de 2016.

IEMA. INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. Parque Estadual Mata das Flores. 2016. Disponível em <<http://www.meioambiente.es.gov.br/>>. Acesso em 10 de março 2016.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2015. Atlas SOS – Informações do Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica período 2013-2014. Disponível em:<<http://mapas.sosma.org.br/dados/>>; acesso em 14 de março 2016.

KAMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Óxidos de alumínio, silício, manganês e titânio. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F., eds. Química e mineralogia do solo; Conceitos básicos. Parte 1. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 573-610, 2009.

LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. F. Numerical ecology, v. 24, Elsevier, 2012.

MARTINS, G. C. et al. Campos nativos e Florestas adjacentes da região de Humaitá (AM): atributos diferenciais dos solos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n.2, p. 221-227, 2006.

MARTINS, S. V. et al. Distribuição de espécies arbóreas em um gradiente topográfico de Floresta Estacional Semidecidual em Viçosa, MG, **Scientia Florestalis**, n.64, p. 172-181, 2003.

MELLO, V. F.; PEREZ, D. V. Equilíbrio químico das reações no solo. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L. R. F., (Eds). Química e mineralogia do solo; Conceitos básicos. Parte 1. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p.151-249, 2009.

MELO, V. F. et al. Mineralogia e formas de potássio e magnésio em diferentes classes de pesos e tamanhos da fração areia de solos do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 28, p. 219-231, 2004.

MELO, V. F. et al. Potássio e magnésio em minerais das frações areia e silte de diferentes solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p.269-284, 2000.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises**. Viçosa, UFV, 2005, 107 p.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, The Hague, v. 76, p. 319-337, 1984.

OKSANEN, J. et al. Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.3-5. 2016. <<http://CRAN.R-project.org/package=vegan>>.

PULLA, S. et al. Controls of soil spatial variability in a dry Tropical Forest. **Plos One**, v. 11, n. 4, 2016.

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

REZENDE, S. B.; RESENDE, M. **Solos dos mares de morros: Ocupação e uso**. In: ALVAREZ V., V. H., FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F., (Ed.). Os solos nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentável. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Universidade Federal de Viçosa, p. 261-289, 1996.

RODRIGUES, L. A. et al. Efeitos de solos e topografia sobre a distribuição de espécies arbóreas em um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, em Luminárias, MG. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 31, n. 1, p. 25-35, 2007.

ROSOLEN, V.; HERPIN, U. Expansão dos solos hidromórficos e mudanças na paisagem: um estudo de caso na região Sudeste da Amazônia Brasileira. **Acta Amazônica**, v. 38, n. 3, p. 483-490, 2008.

ROVEDDER, A. P. M. et al. Relação solo-vegetação em remanescente da Floresta Estacional Decidual na Região Central do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 44, n.12, Santa Maria, 2014.

SANTOS, A. C. et al. Gênese e classificação de solos numa topossequência no ambiente de mar de morros do médio Vale do Paraíba do Sul, RJ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1297-1314, 2010.

SANTOS, R. D. et al. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 6ª ed. Revista e Ampliada. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Embrapa Solos, 2013a. 100p.

SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3ª Ed. Revista e Ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2013-353 p, 2013b. 353 p.

SCIPIONI, M. C. et al. Análise fitossociológica de um fragmento de Floresta Estacional em uma catena de solos no Morro do Cerrito, Santa Maria, RS. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, jul.-set., p. 457-466, 2012.

SEYBOLD, C. A.; McCALLISTER, D. L. Plant growth response to applied K on coarse-textured feldspathic soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.21, p.531-545, 1990.

SILVA, G. E.; SILVA JUNIOR, M. L.; MELO, V.S. Efeitos de diferentes usos da terra sobre as características químicas de um Latossolo Amarelo do Estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 36, p.151–158, 2006.

SOS MATA ATLÂNTICA. FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica no período 2013-2014. 2015, São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica.

TOLEDO, L. O. et al. Análise multivariada de atributos pedológicos e fitossociológicos aplicada na caracterização de ambientes de cerrado no norte de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 33, n. 5, p. 957-968, 2009.

TOWNSEND, A. R.; ASNER, G. P.; CLEVELAND, C. C. The biogeochemical heterogeneity of tropical forests. **Trends in Ecology and Evolution** , v. 23, n.8, 2008.

WERNER, F. A.; HOMEIER, J. Is tropical montane forest heterogeneity promoted by a resource-driven feedback cycle? Evidence from nutrient relations, herbivory and litter decomposition along a topographical gradient. **Functional Ecology**, v. 29, n. 3, p. 430-440, 2015.

WILCKE, W. et al. Soil properties and tree growth along an altitudinal transect in Ecuadorian tropical montane forest. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 2, p. 220-230, 2008.

YIMER, F.; LEDIN, S.; ABDELKADIR, A. Soil property variations in relation to topographic aspect and vegetation community in the south-eastern highlands of Ethiopia. **Forest Ecology and Management**. v. 232, n. 1-3, p. 90-99, 2006.

CAPÍTULO 2

ATRIBUTOS BIOLÓGICOS DO SOLO EM GRADIENTE TOPOGRÁFICO DE FRAGMENTO DE FLORESTA ATLÂNTICA NO SUL DO ESPÍRITO SANTO

Resumo

As propriedades do solo, como a biomassa microbiana e a atividade enzimática são afetadas por diversos fatores, e têm sido consideradas como indicadores biológicos sensíveis às alterações na estrutura dos ecossistemas. Nesse contexto, objetivou-se com o presente estudo, quantificar o padrão de distribuição dos atributos biológicos do solo ao longo de um gradiente topográfico e identificar como os atributos biológicos (B) se relacionam com os atributos químicos (Q), físicos (F) e topográficos (T) num fragmento de Floresta Atlântica no sul do Espírito Santo. O estudo foi realizado no Parque Estadual Mata das Flores, município de Castelo, Espírito Santo, Brasil. As parcelas foram alocadas em um transecto de 750 metros ao longo de gradiente topográfico que varia de 100 m a 180 m de altitude, dispostas em pares distantes 10 metros entre si e a distância entre os pares variando de 20 a 25 m. Cada parcela amostrada foi classificada quanto a sua posição no relevo: baixada, encosta e topo. Foram realizadas análises laboratoriais para caracterização biológica do solo na profundidade de 0,0-0,10 m. Os resultados obtidos indicam que a declividade condicionou a heterogeneidade dos atributos biológicos do solo na topossequência de floresta em regeneração no bioma Floresta Atlântica no sul do Espírito Santo. Os atributos biológicos foram afetados pela sazonalidade. Os atributos biológicos foram modificados pelos atributos químicos do solo ao longo do gradiente topográfico de floresta em regeneração no bioma Floresta Atlântica. Maiores teores de carbono orgânico total, cálcio e magnésio trocáveis e fósforo disponível nos solos correlacionaram-se positivamente com a atividade enzimática.

Palavras-chave: C da biomassa microbiana. Atributos biológicos do solo. Fosfatase ácida. Sazonalidade. β -glucosidade. Solos tropicais. Desidrogenase.

CHAPTER 2

BIOLOGICAL ATTRIBUTES OF SOIL IN GRADIENT ATLANTIC FOREST FRAGMENT TOPOGRAPHICAL IN THE SOUTH OF ESPÍRITO SANTO

Abstract

Soil properties, such as microbial biomass and enzyme activity are affected by many factors, and have been considered as sensitive biological indicators of changes in the structure of ecosystems. In this context, the aim with this study to quantify the pattern of distribution of biological soil properties along a topographic gradient and identify how the biological attributes (B) relate to the chemical attributes (Q), physical (F) and topographic (T) in an Atlantic Forest fragment in the south of the Espírito Santo. The study was conducted in the Mata das Flores State Park, Castelo municipality, Espírito Santo, Brazil. The plots were allocated in a transect of 750 meters along the topographic gradient ranging from 100 to 180 meters, arranged in pairs 10 meters distant from each other and the distance between the pairs ranging from 20 to 25 meters. Each sampled portion was classified by its position in the landscape: lowered, side and top. Laboratory analyzes were performed for biological characterization of the soil in the depth from 0.0-0.10 m. The results indicate that the slope conditioned the heterogeneity of biological soil properties in the forest toposquence regeneration in the Atlantic Forest in the south of the Espírito Santo. The biological properties were affected by seasonality. The biological properties were modified by soil chemical properties along the topographic gradient in forest regeneration in the Atlantic Forest. Higher levels of total organic carbon, calcium and exchangeable magnesium and available phosphorus in soils correlated positively with the enzyme activity.

Keywords: Microbial biomass C. Biological soil properties. Phosphatase acid. Seasonality. β -glucosidase. Tropical soils. Dehydrogenase.

1. INTRODUÇÃO

As Florestas Tropicais apresentam grande importância para o clima global, em razão de sua capacidade de alterar os ciclos da água e carbono por meio da troca de energia, água e gases traços (FISCH et al. 2004). Os ecossistemas florestais, notadamente aqueles estabelecidos em solos de baixa fertilidade natural, apresentam sua manutenção fortemente associada ao equilíbrio entre a cobertura vegetal e os processos biogeoquímicos do solo (CARDOSO et al., 2009). Isso estabelece estreita relação entre comunidades vegetais e atributos do solo (BORGES et al., 2009; CUNHA et al., 2009), que afeta sobremaneira os padrões de crescimento das espécies vegetais e sua distribuição em escala temporal e espacial (DUBUIS et al., 2012).

Devido à multiplicidade dos atributos químicos, físicos e biológicos que controlam os processos biogeoquímicos e suas variações em diferentes escalas aliada à heterogeneidade dos solos, há dificuldade em avaliar sua qualidade e identificar os parâmetros-chave que possam servir como indicadores do funcionamento dos ecossistemas (MENDES; REIS JUNIOR, 2004).

O entendimento sobre como a variabilidade da comunidade arbóreo-arbustiva se relaciona com a heterogeneidade de solos, particularmente em florestas tropicais, é um dos desafios na atualidade e representa uma importante ferramenta para a tomada de decisão na elaboração de estratégias de uso e preservação dos ecossistemas (BURNS et al. 2013; BRECHET et al., 2011; DICK et al., 2015; UNGER; HOMEIER; LEUSCHNER, 2012), a fim de minimizar interferências que possam vir a alterar a estrutura e composição das comunidades vegetais (ALMEIDA et al., 2015).

Nesse contexto, é importante salientar que, os indicadores biológicos do solo, considerada a parte viva e mais ativa da matéria orgânica do solo (MOS) e por atuar em importantes processos biogeoquímicos, apresentam-se mais sensíveis frente aos indicadores químicos e físicos, para detectar, com maior antecedência, alterações que ocorrem na estrutura de um ecossistema (ALVES et al., 2011; CARVALHO et al., 2008; FRANCHINI et al., 2007; MATSUOKA; MENDES; LOUREIRO, 2003; SILVA et al., 2012; TRANNIN; SIQUEIRA; MOREIRA, 2007). A biomassa microbiana é responsável pela reserva lábil e ciclagem de nutrientes no solo, correspondendo, em condições normais, de 1 a 3% do conteúdo total de carbono, e aproximadamente 5% do nitrogênio total do solo (MENDONÇA; MATOS, 2005), sendo esta a principal fonte de enzimas do solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Dentre os fatores responsáveis pela variação dos atributos biológicos do solo, podem ser destacados a umidade do solo (MARTIN; BOLSTAD, 2009; PARRON; BUSTAMANTE; PRADO, 2003); propriedades físicas do solo que controlam o fluxo de gases e a disponibilidade de nutrientes (KOSUGI et al. 2007; REICHERT et al., 2009); topografia do terreno que afeta fortemente tanto o conteúdo de água no solo, quanto às propriedades físicas do solo (CAMPOS et al., 2012) e afeta também o microclima, escoamento superficial e evapotranspiração (KHALILI-RAD et al., 2011).

A biomassa microbiana pode variar com o tipo de solo, vegetação e clima, e sua quantidade está relacionada com a quantidade e qualidade do carbono orgânico aportado ao solo (SILVEIRA, 2007). Assim como outros processos metabólicos, a respiração microbiana depende do estado fisiológico das células e pode mostrar amplas variações em decorrência da umidade, temperatura, disponibilidade de nutrientes, textura, relação C/N, presença de resíduos orgânicos, entre outros (CREMON et al.; 2009; FERREIRA et al., 2007).

Os microrganismos são a principal fonte da maioria das enzimas do solo, seja por meio de síntese e secreção direta, seja como geradores de sinais que induzem a produção de enzimas por outros microrganismos e plantas (DICK; BURNS, 2011). Além de permitir que os microrganismos tenham acesso a energia e nutrientes presentes em substratos complexos, as enzimas são responsáveis pela decomposição e mineralização de nutrientes no solo, disponibilizando-os também para as plantas (SILVEIRA, 2007).

As enzimas fosfatases são fundamentais na mineralização do fósforo (P), uma vez que, catalisam a hidrólise de P orgânico a P inorgânico, tornando-o disponível para a planta. Conforme seu pH ótimo de reação, podem ser classificadas como ácidas (pH 6,5) ou alcalinas (pH 11) (TABATABAI, 1994). A β -glucosidase atua na hidrólise de carboidratos, sendo considerada peça-chave na degradação e mineralização de compostos orgânicos, e também na formação e desenvolvimento de matéria orgânica do solo e componentes estruturais (DENG; POPOVA, 2011). A desidrogenase está envolvida em processos de oxidação biológica de compostos orgânicos pela desidrogenação, sendo algumas altamente específicas. Sua atividade está ligada à quantidade de matéria orgânica no solo e intimamente relacionada à biomassa quando fontes de carbono são adicionadas ao solo (TABATABAI, 1994).

A temperatura é outro fator que afeta, sobremaneira, a atividade enzimática, pois a mesma desempenha papel-chave nos ciclos biogeoquímicos do solo, com efeitos sobre o conteúdo de carbono dissolvido (TIPPING et al., 1999) e emissões de CO₂ e CH₄ (MACHADO, 2005) e

sobre a disponibilidade de nutrientes (FAGERIA, 1998). Verifica-se que temperaturas de 28°C a 35°C, dominantes no bioma Floresta Atlântica, e umidade próxima à capacidade de campo favorecem as reações físicas e químicas, maximizando as atividades microbiológicas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Baseado no exposto, torna-se necessário conhecer o padrão de distribuição dos atributos biológicos ao longo do gradiente topográfico dentro de florestas tropicais, particularmente no bioma Floresta Atlântica. Os resultados podem fornecer as bases para entender como os ciclos biogeoquímicos dos ecossistemas naturais são formados e como podem variar no tempo dando luz ao conhecimento de suas funções na evolução dos pedoambientes e subsidiar estratégias adequadas para o planejamento sustentável dos recursos naturais.

Objetivou-se com este estudo quantificar o padrão de distribuição dos atributos biológicos do solo ao longo de um gradiente topográfico e identificar como os atributos biológicos (B) se relacionam com os atributos químicos (Q), físicos (F) e topográficos (T) num fragmento de Floresta Atlântica no sul do Espírito Santo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em um fragmento florestal, no Parque Estadual Mata das Flores, localizado nas coordenadas 20°35'54" S e 41°10'53" W, com área aproximada de 800 ha, localizado adjacente à área urbana do município de Castelo, Espírito Santo - Brasil. A precipitação anual no município varia entre 1.500 e 2.000 mm, sendo o clima do tipo subtropical, com verão temperado, sem estação seca (Cfb), de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013).

O Parque situa-se no domínio da Floresta Atlântica (Floresta Ombrófila Densa Montana e Estacional Semidecidual (IBGE, 2004). A área é um dos últimos remanescentes florestais de Floresta Atlântica protegidos da região e é também um corredor ecológico importante adjacente aos Parques Estaduais de Forno Grande e Parque Estadual da Pedra Azul, situados em áreas de maior altitude. No Parque ocorrem espécies como *Cedrela*, *Cássia*, Bromélias e Palmáceas e a fauna é composta por pacas, raposas, preguiças, ouriços e macacos-prego. O entorno imediato do Parque é constituído principalmente por propriedades rurais que cultivam cafeeiros e criam gado (IEMA, 2016).

A precipitação acumulada registrada pela estação de Alegre (20°45'S, 41°29'W; 138 m) no período de janeiro/2015 a dezembro/2015 foi de 911,2 mm, a média das temperaturas mínimas foi de 16,8 °C e a média das temperaturas máximas de 37,4 °C (Figura 2 – Introdução Geral).

2.2. Amostragem e coleta de dados

A unidade amostral consistiu de parcela de 10 m x 10 m (0,01 ha). As parcelas foram distribuídas na área do Parque de forma a garantir representatividade quanto aos tipos de ambientes, topografia e extensão da reserva. As parcelas foram alocadas em um transecto de 750 metros ao longo de um gradiente topográfico que varia de 100 m a 180 m de altitude. As parcelas foram dispostas em pares distantes 10 metros entre si e a distância entre os pares variando de 20 m a 25 m. Foram escolhidas por sorteio aleatório 25 parcelas para as coletas de amostras de solo.

As coordenadas geográficas referentes ao centro de cada parcela foram detectadas com auxílio de GPS (*Garmin International, Inc.*, Kansas City, USA). Os dados de precipitação e temperatura anual para o ano de 2015 foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e série histórica climática do período de 1950-1990 (ALVARES et al., 2013). Os atributos topográficos (cota altimétrica, elevação, curvatura, face de exposição, incidência solar e índice de posição topográfica) foram extraídos de um raster SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de banda única com resolução espacial de 30 m (1 arco segundo) utilizando-se ferramentas disponíveis no programa ArcGIS versão 10.3 (ESRI, 2015). A declividade do terreno foi medida em campo por meio de clinômetro. Cada parcela amostrada foi classificada quanto a sua posição no relevo: baixada, encosta e topo conforme (Tabela 1). Os solos das parcelas da baixada foram caracterizados como Gleissolos, os solos das parcelas da encosta foram caracterizados como Argissolos Vermelho-Amarelos e os solos localizados nos topos foram caracterizados como Latossolos Vermelho-Amarelos (SANTOS et al, 2013a; 2013b).

A coleta do solo para caracterização biológica foi realizada em duas épocas do ano, sendo uma no mês de fevereiro de 2015 e outra no mês de agosto de 2015, correspondendo às estações climáticas verão e inverno, respectivamente. Antes das coletas das amostras de solo foi feita a remoção da serapilheira presente na superfície do solo. A coleta do solo foi realizada por meio da abertura de pequenas trincheiras de 0,10 m de profundidade em cada parcela, retirando-se, com auxílio de uma espátula, três amostras compostas de solo obtidas a

Tabela 1. Descrição geral das parcelas de coleta das amostras de solo em Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil

Parcelas	Latitude	Longitude	Elevação (m)	Declividade* (%)	Relevo	OP ¹	Posição topográfica
P15	20°36'44,28"S	41°10'06,01"W	117	-	Plano	Sul	Baixada
P15A	20°36'45,20"S	41°10'06,44"W	117	-	Plano	Oeste	Baixada
P14A	20°36'46,09"S	41°10'05,08"W	119	-	Plano	Sudoeste	Baixada
P14B	20°36'46,76"S	41°10'04,27"W	122	-	Plano	Sudoeste	Baixada
P13	20°36'47,20"S	41°10'02,66"W	126	27	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P13C	20°36'48,25"S	41°10'02,66"W	123	16	Ondulado	Oeste	Baixada
P12B	20°36'48,85"S	41°10'00,24"W	134	21	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P12C	20°36'49,24"S	41°10'00,60"W	128	31	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P11A	20°36'49,64"S	41°10'00,31"W	128	21	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P11B	20°36'49,58"S	41°09'59,03"W	143	22	Forte Ondulado	Oeste	Encosta
P11D	20°36'50,67"S	41°09'57,35"W	149	27	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P10	20°36'51,38"S	41°09'56,44"W	142	27	Forte Ondulado	Sul	Encosta
P10C	20°36'52,80"S	41°09'55,79"W	136	29	Forte Ondulado	Sul	Encosta
P9B	20°36'53,63"S	41°09'54,45"W	125	32	Forte Ondulado	Sul	Encosta
P9C	20°36'53,87"S	41°09'55,22"W	125	36	Forte Ondulado	Sul	Encosta
P8A	20°36'54,52"S	41°09'54,11"W	118	-	Plano	Sul	Baixada
P8C	20°36'54,86"S	41°09'53,51"W	118	-	Plano	Noroeste	Baixada
P7	20°36'55,28"S	41°09'51,48"W	137	29	Forte Ondulado	Noroeste	Encosta
P7A	20°36'55,73"S	41°09'52,13"W	137	28	Forte Ondulado	Oeste	Encosta
P6A	20°36'56,86"S	41°09'50,21"W	149	25	Forte Ondulado	Noroeste	Topo
P6B	20°36'56,55"S	41°09'49,00"W	171	23	Forte Ondulado	Noroeste	Topo
P6D	20°36'57,24"S	41°09'48,25"W	171	15	Ondulado	Oeste	Topo
P5A	20°36'59,19"S	41°09'47,63"W	173	7	Suave Ondulado	Sul	Topo
P5B	20°36'59,44"S	41°09'46,50"W	161	16	Ondulado	Sudeste	Topo
P4	20°36'59,84"S	41°09'45,55"W	154	24	Forte Ondulado	Sudeste	Topo

¹OP = Orientação da parcela. *Valores não medidos em campo (< 3%).

partir de três sub-amostras simples (aproximadamente 300 g cada), na profundidade de 0,0-0,10 m. Após a coleta, as amostras de solo foram homogeneizadas e acondicionadas em sacos plásticos, conduzidas ao Laboratório de Matéria Orgânica do Solo do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES). No laboratório, parte do solo de cada amostra foi acondicionada em saco plástico e mantida sob refrigeração de 4-6° C até o momento de serem analisadas com relação ao conteúdo de carbono da biomassa microbiana (CBM), nitrogênio da biomassa microbiana do solo (NBM), respiração basal do solo (RBSA) e atividade da fosfatase ácida (FA), β -glucosidase (BG) e desidrogenase (DES). Antes de proceder-se às análises, as amostras foram destorroadas e passadas por peneira de 2,0 mm de malha, retirando-se as raízes e resíduos visíveis de plantas e pequenos organismos do solo. Antes de ser refrigerada, parte do solo de cada amostra foi reservado para ser seco ao ar, destorroadado e passado em peneira com malha de 2,0 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar para análises de COT, NT, N mineralizável anaerobicamente (NMA). Parte do solo de cada amostra foi reservada para determinação do teor de umidade do solo. O teor de umidade do solo em ambas as coletas (verão e inverno) foi determinado pelo método gravimétrico segundo Embrapa (2011).

2.3. Análises laboratoriais de solo

A descrição das análises dos atributos químicos e físicos do solo na profundidade de 0,0-0,10 m encontra-se no Capítulo 1. Os resultados das análises laboratoriais da atividade biológica do solo foram expressos para a profundidade de 0,0-0,10 m.

2.3.1. Carbono orgânico total (COT), Nitrogênio total (NT) e relação COT/NT

Os teores de carbono orgânico total (COT) foram quantificados por oxidação por via úmida com dicromato de potássio em meio ácido, com aquecimento externo e determinado por titulometria, conforme descrito por Mendonça e Matos (2005). Os teores de Nitrogênio total (NT) foram quantificados por meio da destilação em aparelho semimicro Kjeldahl das amostras digeridas, com o uso de solução de ácido bórico como indicador e de HCl 0,05 mol L⁻¹ como solução titulante (TEDESCO et al., 1995). A relação COT/NT foi calculada a partir dos resultados dos teores de COT e NT previamente determinados.

2.3.2. Nitrogênio mineralizável anaerobicamente (NMA)

O nitrogênio mineralizável anaerobicamente (NMA) foi determinado conforme método de incubação anaeróbica descrito por Keeney (1982). Amostras de 5 g de solo, trituradas em almofariz e passadas em peneira de 0,210 mm foram acondicionadas em um tubo do tipo falcon, juntamente com adição de 12,5 mL de água deionizada, os tubos foram tampados e incubados a 40° C durante sete dias. Após a incubação, o conteúdo dos tubos foi transferido quantitativamente para frascos de destilação de 150 mL, utilizando-se para isso 12,5 mL de solução de KCl 1 mol L⁻¹. Os frascos de destilação receberam também a adição de 0,2 g de MgO. O NH₄⁺ presente na amostra de agregados foi dosado a partir da quantidade de NH₃ liberada pela destilação em meio alcalino e que foi recolhida em erlenmeyer de 125 mL, contendo 5 mL da solução indicadora em ácido bórico. A solução obtida na destilação foi titulada com solução padronizada de H₂SO₄ 0,0025 mol L⁻¹. Paralelamente, determinou-se o teor de NH₄⁺ nas amostras do material dos agregados não-incubados (N inicial). Os teores de NH₄⁺, em mg kg⁻¹, foram calculados pela expressão: $NH_4^+ = \frac{(V_A - V_B)M14}{m_{\text{solo}}}$, em que VA: volume de H₂SO₄ gasto na titulação da amostra (L); VB: volume de H₂SO₄ gasto na titulação do branco (L); M: concentração de H₂SO₄ (mmol L⁻¹); 14: massa de N (mg mmol⁻¹); e m solo: massa da amostra de agregados de solo (kg). Pela diferença entre os teores de NH₄⁺ das amostras de agregados incubadas e os das não-incubadas calculou-se o NMA.

2.3.3. C e N da biomassa microbiana do solo (CBM e NBM)

Os teores de C e N da biomassa microbiana (CBM e NBM) foram determinados empregando-se o método da irradiação-extração conforme descrito em Mendonça e Matos (2005). O método baseia-se na extração do C microbiano após a morte dos microorganismos e lise celular pelo uso de microondas, com a liberação dos constituintes celulares e posterior quantificação. O C e N nos extratos foi quantificado de acordo com Tedesco et al. (1995). Após a obtenção dos dados foi calculada a relação entre a teor de CBM e COT (qMIC), utilizando-se a equação $qMIC = CBM/COT \times 100$ (SPARLING, 1992).

2.3.4. Respiração basal de C-CO₂ (Emissão de CO₂)

A respiração basal do solo (RBSA) foi determinada, nas amostras de solo, pela quantificação do CO₂ liberado durante 21 dias de incubação em sistema fechado conforme descrito em Mendonça e Matos (2005). O método se baseia na captura de C-CO₂, emitido durante a respiração dos microorganismos da amostra de solo incubada junto com a solução de NaOH a 0,5 mol L⁻¹, em recipiente fechado hermeticamente a 25°C, previamente incubado por dez

dias a 60% da capacidade de campo para restituição da população microbiana do solo, em recipiente de 500 cm³ com fechamento hermético, seguindo-se com a incubação a uma temperatura de aproximadamente 25 °C, por 48 horas. Após esse período, o recipiente foi aberto por 15 minutos, para troca de ar com o ambiente. Foram pipetados 10 mL da solução de NaOH incubada, em erlenmeyer, e adicionaram-se 10 mL de cloreto de bário a 0,05 mol L⁻¹. A solução do erlenmeyer foi titulada com HCl a 0,25 mol L⁻¹ após a adição do indicador (fenolftaleína). Prosseguindo-se com a avaliação no 5º, 8º, 12º, 16º, 21º dias após a incubação. A quantidade total de C-CO₂ produzida foi igual ao somatório dos valores obtidos durante o intervalo de tempo de incubação (MENDONÇA; MATOS, 2005). O quociente metabólico (qCO₂) foi calculado pela relação entre a respiração basal e o C da biomassa microbiana (ANDERSON; DOMSCH, 1993) e expresso em µg CO₂/µg CBM dia⁻¹.

2.3.5. Atividade enzimática da Fosfatase ácida, β-glucosidase e Desidrogenase

A atividade da fosfatase ácida foi avaliada pelo método descrito em Tabatabai (1994). O método é baseado na determinação colorimétrica de p-nitrofenol liberado após a incubação de solo com p-nitrofenil fosfato por 1h a 37°C. A atividade de β-glucosidase foi estimada de acordo com Tabatabai (1994). O método é baseado na determinação colorimétrica de p-nitrofenol liberado pela enzima, após a incubação de solo com solução de p-nitrofenil-beta-D-glicopironosídeo por 1h a 37°C. A atividade da desidrogenase foi determinada segundo o método descrito em Tabatabai (1994). O método é baseado na determinação com metanol e determinação colorimétrica de TPF (trifenilformazan) produzido da reação de TTC (cloridrato de 2,3,5 – trifeniltetrazólio) em solo após a incubação das amostras do solo por 24h a 37°C.

2.4. Análise estatística dos dados

Para identificar o padrão de distribuição dos atributos biológicos ao longo do gradiente topográfico, foram utilizados dois métodos de ordenação: Análise de Componentes Principais (ACP) e Análise de Redundância (RDA) (do termo em inglês *Redundance Analysis*). Inicialmente, o coeficiente de correlação de Pearson (r) foi utilizado para detectar a colinearidade entre as variáveis quantitativas, dentro da comparação de cada conjunto de dados, na análise de componentes principais.

Todas as análises multivariadas foram realizadas após a padronização das variáveis em que cada dado foi subtraído pela média e dividido pelo desvio padrão, ao final, cada variável ficou com média igual a zero e variância igual a 1. As variáveis contidas na matriz topográfica

foram derivadas do raster SRTM de resolução espacial de 30 m, exceto a declividade medida em campo por clinômetro. Foi utilizado o VIF (fator de inflação da variância, do termo em inglês *variation inflation factor*) a fim de verificar a multicolinearidade entre as variáveis preditoras (BORCARD; GILLET; LEGENDRE, 2011). Para identificar como os atributos biológicos (**B**) se relacionam com os atributos químicos (**Q**), físicos (**F**) e topográficos (**T**) foi utilizada a análise de redundância seguida de partição da variação (LEGENDRE; LEGENDRE, 2012).

A análise dos dados foi realizada nos seguintes passos. Em primeiro lugar, foi realizada uma seleção de variáveis explicativas por meio de modelos de regressão parciais para selecionar variáveis que significativamente ($P < 0,05$ após 999 permutações aleatórias) contribuíram para explicar as variações dos atributos biológicos. A seleção foi realizada separadamente para cada um dos três conjuntos de variáveis explicativas (Q, F, T) para a variável de resposta (B). Os modelos de regressão parciais foram definidos como se segue: (i) RDA modelo geral - TVE; (ii) RDA parcial dos atributos químicos; (iii) RDA parcial dos atributos físicos; (iv) RDA parcial dos atributos topográficos; (v) RDA parcial limitado por variáveis químicas utilizando variáveis físicas e topográficas como co-variáveis; (vi) RDA parcial limitado por variáveis físicas usando variáveis químicas e topográficas como co-variáveis; (vii) RDA parcial limitado por variáveis topográficas usando variáveis químicas e físicas como co-variáveis. Para avaliar se existe diferença significativa entre os resultados nos períodos de coleta foi realizado teste t pareado de Wilcoxon (WILCOXON, 1945).

A análise estatística dos dados foi realizada utilizando o software R (R CORE TEAM, 2015), com auxílio dos pacotes Vegan (OKSANEN et al., 2016), Packfor (DRAY; BLANCHET, LEGENDRE, 2013) e MASS (VENABLES; RIPLEY, 2002).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A média e o erro-padrão dos atributos biológicos dos solos na profundidade de 0,0-0,10 m na baixada, encosta e topo, encontram-se na Figura 1.

A ocorrência de nutrientes prontamente disponíveis e melhores condições climáticas favoráveis, como maior disponibilidade hídrica no período de coleta (fevereiro - 57,2 mm e $T_{méd}$ de 30,5 °C) (Figura 2 – Introdução Geral) promoveu maior estímulo ao crescimento da população microbiana, expresso por maiores valores de CBM no solo da baixada no verão.

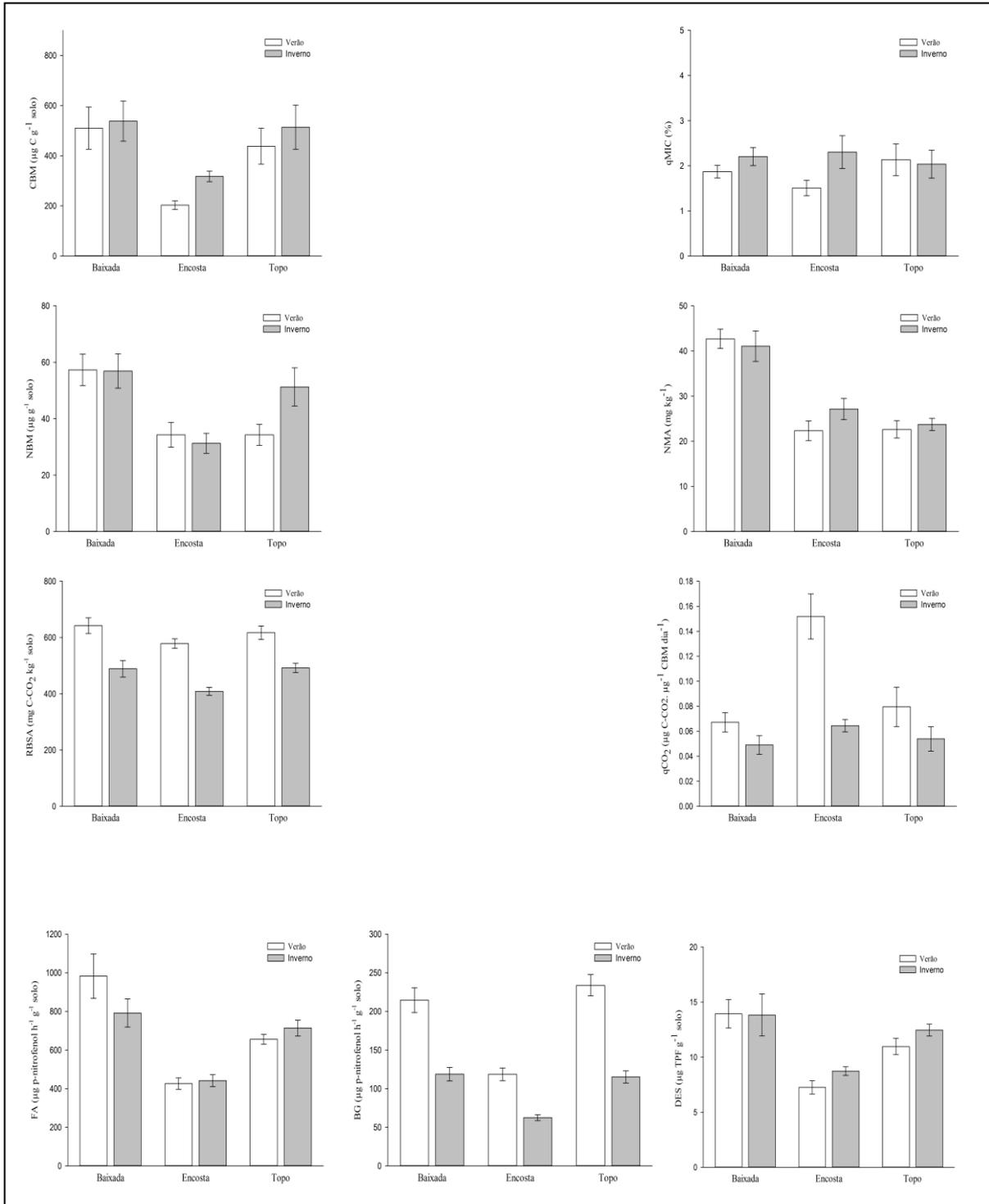


Figura 1 - Caracterização biológica das amostras de solo coletadas na profundidade de 0,0-0,10 m em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, no verão e inverno, Espírito Santo, Brasil. CBM = carbono da biomassa microbiana; qMIC = quociente microbiano; NBM = nitrogênio da biomassa microbiana; NMA = nitrogênio mineralizável anaerobicamente; RBSA = respiração basal do solo acumulada ($\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ de solo); qCO₂ = quociente metabólico ($\mu\text{g C-CO}_2 \mu\text{g}^{-1}$ CBM dia⁻¹), FA = fosfatase ácida; BG = β -glucosidase; DES = desidrogenase.

No inverno, o comportamento similar, no solo da baixada, com maior fertilidade natural, apresentou maiores valores de CBM ($538,18 \pm 79,85 \mu\text{g g}^{-1}$ solo) comparado ao solo da encosta e do topo. A atividade das enzimas relaciona-se positivamente com a fertilidade do

solo, de modo que, maiores quantidades de biomassa correlacionam-se com aumento na atividade enzimática, indicando que a atividade enzimática é diretamente proporcional a mineralização de nutrientes pelos microrganismos do solo (KUMARI; SINGARAM, 1995; MARCHIORI JUNIOR; MELO, 1999). Os teores médios de CBM encontrados no presente estudo estão de acordo com aqueles encontrados na literatura para áreas de Florestas Tropicais (JAKELAITIS et al., 2008; RANGEL-VASCONCELOS et al., 2015).

A atividade da fosfatase ácida (FA) apresentou maiores valores associados ao solo da baixada no verão ($982,78 \pm 115,20 \mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1}\text{g}^{-1}$ solo), seguido do topo e da encosta (Figura 1). Comportamento similar foi verificado no inverno, com maiores valores associados ao solo da baixada ($791,85 \pm 72,79 \mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1}\text{g}^{-1}$ solo). Os maiores valores de FA encontrados no solo das parcelas da baixada estão associados ao maior teor de COT, menor acidez ($\text{pH H}_2\text{O} = 5,84 \pm 0,19$), maior disponibilidade de P no ambiente, menor teor de argila, ambiente mais úmido comparado a encosta e topo. Conte, Anghinoni e Rheinheimer (2002) observaram, em solos de região tropical, atividade da fosfatase ácida igual a $1.504 \mu\text{g de p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$ de solo de mata nativa, sendo os resultados atribuídos a liberação de fosfatase ácida convertendo formas de P orgânicas (Po) em inorgânicas (Pi), condicionando o crescimento de plantas à biociclagem de P no sistema. Além disso, não ocorreu redução da fosfatase ácida em solo cultivado com o aumento da disponibilidade de P, sendo que os fatores como a quantidade e qualidade de resíduos aportados no solo, baixa interferência da fase mineral, menor variação de temperatura e umidade do ambiente, bem como, menor acidez do solo ($\text{pH H}_2\text{O} = 5,6$ na Floresta), contribuíram para aumento da atividade da fosfatase no ambiente natural.

No verão, a atividade da β -glucosidase (BG) apresentou maiores valores no solo do topo ($233,77 \pm 13,75 \mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1}\text{g}^{-1}$ solo) e no inverno, maiores valores de BG estiveram associados ao solo da baixada ($118,76 \pm 8,78 \mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1}\text{g}^{-1}$ solo) (Figura 1). O aumento da atividade da BG no topo, em solo mais argiloso, no verão, não necessariamente coincidiu ao crescimento da biomassa microbiana, sobretudo pela maior proteção das enzimas conferida pela argila neste ambiente. De acordo com Burns et al. (2013), muitas enzimas, como a β -glucosidase, podem ocorrer no solo tanto na forma livre de enzima extracelular, como podem ser estabilizadas e retidas na superfície de minerais de argila, ácidos húmicos e partículas de matéria orgânica do solo. No inverno, maior quantidade de matéria orgânica lábil sobre o solo na baixada pode ter provocado aumento da atividade da β -glucosidase. Segundo Badiane et al. (2001) há correlação entre a atividade da β -glucosidase e a quantidade

e qualidade de resíduos orgânicos adicionados ao solo. A atividade enzimática pode aumentar com o aumento da matéria orgânica do solo, em função da dependência da comunidade microbiana pelo C fornecido no substrato (NAHIDAN; NOURBAKHS; MOSADDEGHI, 2014).

A desidrogenase (DES) apresentou maiores valores de atividade no solo das parcelas da baixada, tanto no verão ($13,94 \pm 1,29 \mu\text{g g}^{-1}$ TTF no solo), quanto no inverno ($13,83 \pm 1,90 \mu\text{g g}^{-1}$ TTF no solo), comparada aos encontrados nos solos das parcelas da encosta e topo (Figura 1). Dkhar e Mishra (1983) observaram que a atividade da desidrogenase e a população microbiana do solo foram afetadas positivamente por maiores níveis de nutrientes, C orgânico e umidade do solo, de forma que solos com maior população microbiana exibiram maior atividade enzimática. O resultado do presente estudo corrobora com esta observação, uma vez que na baixada encontra-se maiores teores de nutrientes e apresenta maior atividade da desidrogenase em ambos os períodos de coleta. Vasconcellos et al. (2013) encontraram em área de Floresta Estacional Semidecídua, valores médios para atividade da desidrogenase igual ($25,75 \pm 3,0 \mu\text{g g}^{-1}$ TTF no solo) em floresta nativa (NT) e ($10,4 \pm 1,0$; $9,47 \pm 0,4$; $6,0 \pm 0,3 \mu\text{g g}^{-1}$ TTF no solo) para áreas em recuperação (R20, R10 e R05, respectivamente) localizadas no Estado de São Paulo, sendo que a atividade da desidrogenase na NT foi superior às demais áreas avaliadas.

O nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) apresentou maiores valores associados ao solo da baixada, tanto no verão ($57,28 \pm 5,57 \mu\text{g g}^{-1}$ solo), quanto no inverno ($56,91 \pm 6,10 \mu\text{g g}^{-1}$ solo) comparado aos teores encontrados nos solos das parcelas da encosta e do topo (Figura 1). O NBM apresentou correlação com o nitrogênio mineralizável anaerobicamente (NMA) ($r = 0,54$) no verão e ($r = 0,50$) no inverno. O NMA apresentou maiores valores associados aos solos da baixada no verão e inverno ($42,70 \pm 2,14 \text{ mg kg}^{-1}$ e $41,06 \pm 3,37 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente) (Figura 1).

Os valores médios de NBM encontrados no presente estudo estão de acordo com os encontrados na literatura para Florestas Tropicais (RANGEL-VASCONCELOS, 2015; VASCONCELLOS et al., 2013). Os maiores valores de NBM e NMA encontrados no solo das parcelas da baixada podem ser justificados pela atividade microbiana (maiores valores de DES) e qualidade do material vegetal aportado no solo, permitindo maiores teores de N e incrementos de N na biomassa microbiana. O N absorvido pelas plantas está altamente associado ao teor de N mineralizado, sendo que os principais fatores que afetam na

mineralização do N referem-se ao grau de recalcitrância da MOS, atividade microbiana e manejo do solo (ROHDEN et al., 2006). A camada 0,0-0,10 m do solo da baixada apresenta uma importante fonte de N, na forma orgânica, que tende a ser mineralizado expressivamente comparado ao solo da encosta e topo. Os solos da baixada apresentam diferentes graus de hidromorfismo, porém a amonificação pode ocorrer em condições de baixa aeração por meio de microrganismos aeróbios facultativos e ou anaeróbios (CANTARELLA, 2007) possibilitando a conversão de N orgânico em $N-NH_4^+$ em ambientes úmidos. Zaia et al. (2012) observaram valores de NMA, variando de 60 a 87 $mg\ kg^{-1}$ na camada de 0,0-0,10 m sob sistema agroflorestal de cacau e Floresta Ombrófila Densa na Bahia, Brasil. Barreto et al. (2010) relataram valor médio de N mineralizável no solo igual a 58 $mg\ kg^{-1}$ na camada de 0,0-0,10 m sob plantações de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo, Brasil.

A respiração basal do solo acumulada (RBSA) apresentou maiores valores associados ao solo da baixada em ambos os períodos de coleta, sendo $642,13 \pm 27,80\ mg\ C-CO_2\ kg^{-1}$ de solo no verão e $488,86 \pm 29,06\ mg\ C-CO_2\ kg^{-1}$ de solo no inverno (Figura 1). Ocorreu decréscimo na atividade metabólica do solo ao longo do gradiente, no período de menor disponibilidade hídrica (agosto). Nunes et al (2009) encontraram redução na respiração basal para solos sob Floresta, no período de menor umidade do solo. Orchard e Cook (1983) sugerem uma relação linear entre o potencial ótimo de água no solo e a atividade biológica. Petry et al. (2012), observaram valores mais altos de respiração basal em área de floresta nativa secundária da região de Montenegro-RS com $728,7\ mg\ C-CO_2\ kg^{-1}$ solo, após 20 dias de incubação. Entretanto, a redução da respiração microbiana e o aumento da biomassa microbiana durante o inverno (período seco) indicam que no momento da coleta de solo no inverno, a biomassa microbiana do solo estava imobilizando nutrientes em seu tecido ao invés de mineralizando. Esses resultados corroboram com os resultados obtidos por Rangel-Vasconcellos et al. (2005) ao avaliar a biomassa microbiana do solo e sua atividade em uma cronosequência (2, 6 e 14 anos) de vegetação secundária nas estações seca e chuvosa na Amazônia Oriental.

O qCO_2 apresentou maiores valores associados à encosta no período verão e no inverno ($0,15 \pm 0,01\ \mu g\ C-CO_2\ \mu g^{-1}\ CBM\ dia^{-1}$ e $0,06 \pm 0,005\ \mu g\ C-CO_2\ \mu g^{-1}\ CBM\ dia^{-1}$, respectivamente) e os menores valores foram encontrados nos solos da baixada em ambos os períodos de coleta de solo. Os resultados indicam que na encosta ocorreu maior gasto energético para manutenção da população microbiana nos períodos avaliados, ou seja, devido às condições de estresse, os microrganismos consumiram mais substrato para sobreviverem. De acordo com Jakelaitis et al. (2008), maior valor de qCO_2 indica que o solo apresenta maior grau de

distúrbio ou população microbiana em condições desfavoráveis. Jakelaitis et al. (2008) avaliando a camada superficial de solo sob floresta, pastagem e áreas cultivadas em solos tropicais, observaram valores de 0,05 a 0,18 $\mu\text{g C-CO}_2 \cdot \mu\text{g}^{-1} \text{CBM dia}^{-1}$, sendo os menores valores obtidos na área de vegetação natural.

O qMIC apresentou maiores valores associados ao solo do topo ($2,13 \pm 0,35\%$) no verão. Enquanto, no inverno, o solo das parcelas da encosta apresentou maiores valores de qMIC ($2,30 \pm 0,36\%$) (Figura 1). Todos os ambientes (baixada, encosta e topo) apresentaram valores de qMIC superiores a 1%. O quociente microbiano representa de 1% a 4% do carbono total do solo e, comumente, valores abaixo de 1% são atribuídos a algum fator limitante à atividade da biomassa microbiana (JAKELAITIS et al., 2008). A amplitude dos valores de qMIC pode ser interpretada como o padrão de entrada ou de saída de MOS, a eficiência de conversão de C microbiano, as perdas de C do solo e estabilização do C orgânico da fração mineral do solo (LOPES et al., 2011). De acordo com Balota et al. (1998), solos que possuem maior ou menor quociente microbiano indicam, respectivamente, tendência ao acúmulo ou perda de C do solo.

Na análise de componentes principais (ACP) foi utilizado o conjunto dos atributos biológicos para ambos os períodos estudados, considerando os dois primeiros eixos fatoriais – CP1 e CP2 (Tabela 2).

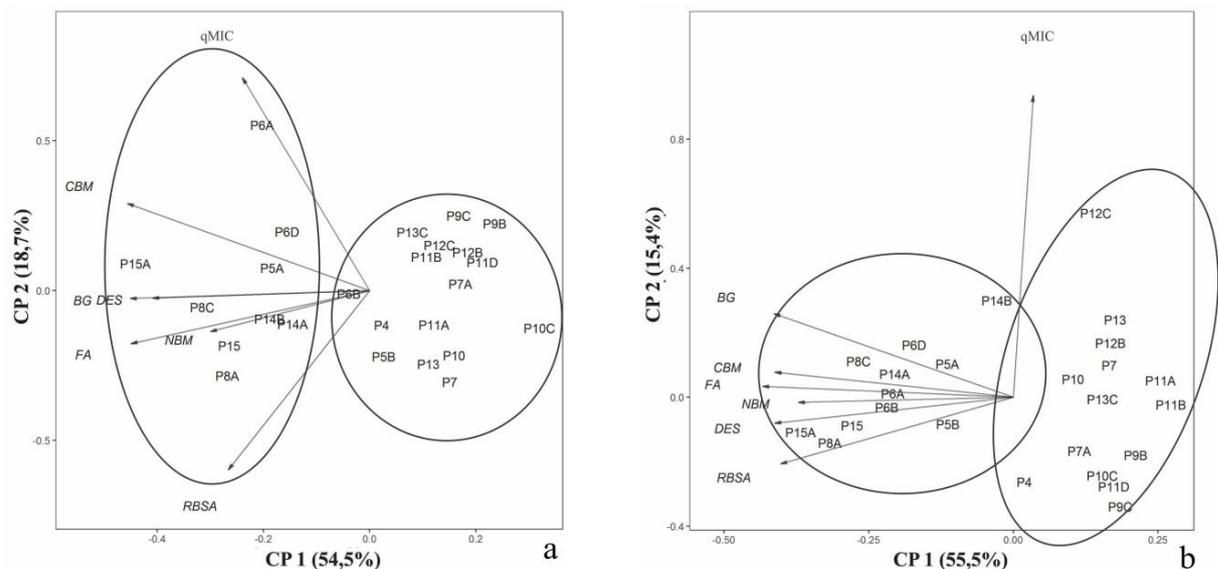
Tabela 2 - Componentes principais (CP_i), autovalores (λ_i), variância explicada pelos componentes principais e correlação (1) entre variáveis originais e componentes principais no período verão e inverno, respectivamente.

Atributos do solo	Componente principal		Componente principal	
	Verão		Inverno	
	CP1	CP2	CP1	CP2
<i>Autovalor (λ_i)</i>	3,81	1,31	3,88	1,07
<i>Variância exp.</i>	54,48	18,72	55,55	15,42
CBM	-0,89	0,33	-0,81	0,08
qMIC	-0,46	0,81	0,06	0,97
NBM	<u>-0,58</u>	-0,15	-0,73	-0,01
RBSA	-0,52	-0,68	-0,79	-0,21
FA	-0,87	-0,20	-0,85	0,03
BG	-0,88	-0,03	-0,81	0,26
DES	-0,79	-0,02	-0,81	-0,08

¹Correlações > 0,7 – forte; correlação < 0,7 e > 0,5 – fraca; CBM = carbono da biomassa microbiana; qMIC = quociente microbiano; NBM = nitrogênio da biomassa microbiana; RBSA = respiração basal do solo acumulada; FA = fosfatase ácida; BG = β -glucosidase; DES = desidrogenase.

O período verão apresentou, nos componentes CP1 e CP2, variância que explica 73,20% da variabilidade total dos atributos biológicos no solo, sendo 54,48% e 18,72%; pelo 1º e 2º eixo, respectivamente (Tabela 2). Em relação ao período inverno, os dois primeiros eixos apresentaram variância explicando 70,97% da variabilidade total dos dados, com 55,55% para o CP1 e 15,42% para o CP2. O N mineralizável e o quociente metabólico não foram incluídos, devido à correlação com outras variáveis (NMA com NBM no verão e inverno, $r = 0,54$ e $r = 0,50$, respectivamente) e (qCO_2 com CBM no verão e inverno, $r = -0,79$ e $r = -0,86$, respectivamente). No verão, houve alta correlação negativa entre o CP1 e as variáveis CBM, FA, BG e DES. Enquanto o CP2 apresentou maior correlação com o qMIC para explicar a variabilidade dos dados no verão (Tabela 2). O CBM apresentou maior valor associado ao solo das parcelas da baixada no verão ($510,13 \pm 84,27 \mu\text{g g}^{-1}$ solo) e inverno ($538,18 \pm 79,85 \mu\text{g g}^{-1}$ solo) comparado ao solo das parcelas de encosta e do topo. No inverno, houve alta correlação negativa entre o CP1 e as variáveis CBM, NBM, RBSA, FA, BG e DES, enquanto o CP2 novamente apresentou maior correlação com o qMIC para explicar a variabilidade dos dados (Tabela 2).

Em relação à formação dos grupos na análise de componentes principais, no verão foi observado que as parcelas da baixada apresentaram similaridade com algumas parcelas do topo (P5A, P6A e P6D) e a parcela P13C apresentou dissimilaridade com as parcelas da baixada, formando grupo distinto com parcelas de encosta e topo (Figura 2 a e b).



Em relação ao período inverno, novamente, as parcelas da baixada apresentaram similaridade com algumas parcelas do topo (P5A, 5B, P6A, P6B, P6D) e a parcela P13C apresentou similaridade com parcelas de encosta e topo (Figura 2 a e b). As parcelas da baixada apresentaram similaridade com as parcelas do topo para atividade biológica devido, principalmente, às diferenças do grau de hidromorfismo nos solos das parcelas da baixada, pois as microelevações em algumas parcelas permitiram um microclima favorável aos microrganismos. Isso indica que a distribuição dos atributos biológicos do solo apresentou forte dependência da topografia, para a ciclagem de nutrientes no solo, ao produzir gradientes de umidade no solo favoráveis à atividade microbiana. De acordo com Fisk, Schmidt e Seastedt (1998), os processos de ciclagem de nutrientes estão relacionados com variações de umidade, entre partes altas que tendem a apresentar melhor drenagem, e as partes baixas, onde a umidade tende a ser maior. Em solos bem drenados, a velocidade de degradação de tecidos foliares pode ser mais acelerada quando comparada com ambientes de maior umidade, que implicam em condições anaeróbicas (DICK; SHUMACHER et al., 2015).

Além disso, enzimas extracelulares podem ser complexadas por argilas e matéria orgânica por um mecanismo que confere proteção e contribui para a estabilização das enzimas nas suas superfícies (NANNIPIERI; KANDELER; RUGGIERO, 2002; NAHIDAN; NOURBAKSH; MOSADDEGHI, 2014). Acrescenta-se que os microrganismos podem ser beneficiados de forma indireta pela decomposição de substratos mais lábeis (LIU et al., 2010). Isso também pode justificar a similaridade de algumas parcelas do topo, alocadas sobre solo mais argiloso, com as parcelas da baixada. Tais fatores podem afetar a decomposição da quantidade e qualidade do material orgânico aportado e incorporado no solo, e também a população dos microrganismos no solo (TAJIK; AYOUBI; NOURBAKSH, 2012).

A lenta decomposição de serrapilheira no solo, em especial nas encostas, pode conduzir a crescente imobilização de cátions básicos e outros nutrientes, por exemplo, N e P (OSONO; TAKEDA 2004), reduzindo a disponibilidade desses nutrientes para as plantas. Esta imobilização pode intensificar as limitações de nutrientes e acidificação do solo nas encostas superiores (DE SCHRIJVER et al. 2011). Basnet et al. (1992), observaram que a diversidade de microclimas no gradiente topográfico varia ainda, conforme o tipo de solo e regimes de umidade, de forma a afetar a área foliar e imprimir diferença na produção vegetal.

A Análise de Redundância dos atributos biológicos foi realizada com o objetivo de identificar as variáveis topográficas preditoras do padrão de distribuição dos atributos biológicos do solo.

Na primeira análise, todas as variáveis topográficas (elevação, declividade, seno de aspecto, cosseno de aspecto, curvatura do terreno, incidência solar direta, índice de posição topográfica) foram incluídas. O teste estatístico foi feito por meio da ANOVA e procedeu-se à seleção de variáveis, seguindo o método de Blanchet, Legendre e Borcard (2008). A variável selecionada para o período verão foi a declividade, a qual foi significativa ($p = 0,001$) e maximizou o R^2 ajustado = 0,39. No período inverno, a variável selecionada também foi a declividade (R^2 ajustado = 0,29 e $p = 0,001$).

De forma geral, o período verão apresentou toda variação retida no primeiro eixo (RDA1), esta variância explica 41,64% da variabilidade total dos dados (Figura 3, a). O período inverno, também apresentou toda variação retida no primeiro eixo (RDA1), esta variância explica 32,75% da variabilidade total dos dados (Figura 3, b).

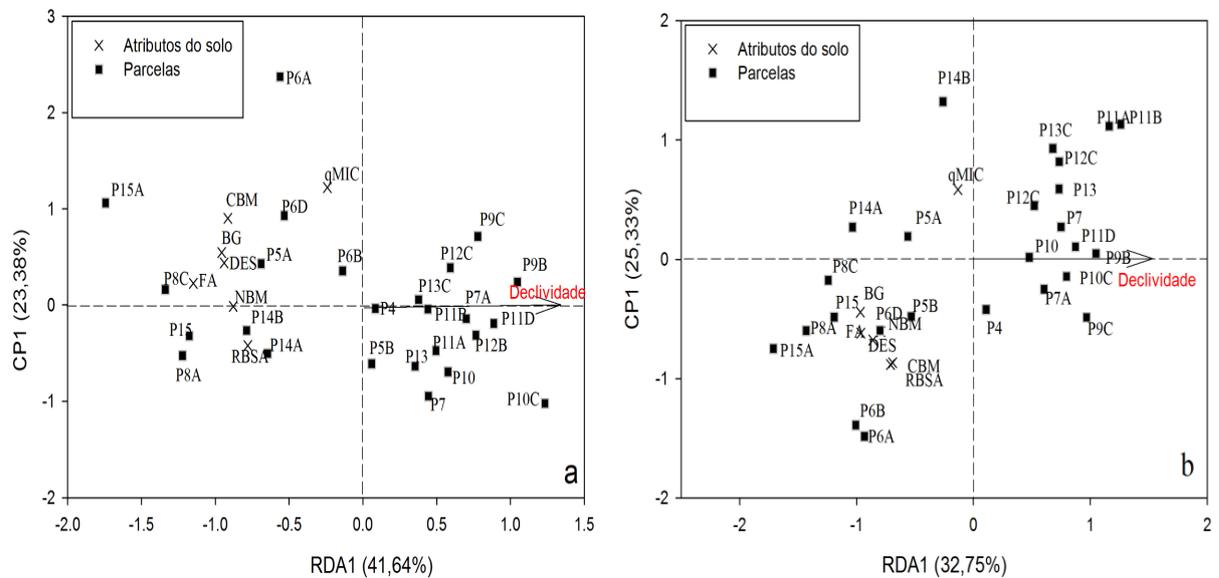


Figura 3 - Análise de redundância dos valores médios dos atributos biológicos do solo na profundidade de 0,0-0,10 m e variáveis topográficas no período verão (a) e inverno (b), em área de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil.

Os resultados da análise de redundância indicam que o modelo de distribuição dos atributos biológicos do solo está mais associado à declividade, o que não exige a contribuição de outras variáveis topográficas aqui utilizadas como causa desta heterogeneidade (como por exemplo, incidência solar, face de exposição solar). Comumente, as áreas de maior declive (encostas) apresentam maior instabilidade do terreno, em razão da maior vulnerabilidade à ação da água. Sendo assim, a topografia, considerada o principal fator que afeta o local de microclima, escoamento superficial e evapotranspiração (NAHIDAN; NOURBAKHS; MOSADDEGHI, 2014) pode condicionar a química do solo e as propriedades biológicas (KHALILI-RAD et al. 2011).

Segundo Nahidan, Nourbakhsh e Mosaddeghi (2014), a atividade enzimática por unidade de C da biomassa é maior na face Norte comparada aos solos da face Sul em condições semi-áridas na região central do Irã, além disso, maior teor de água no solo foi observado nas posições voltadas para a face Norte. Desta forma, em condições tropicais, parcelas voltadas para o Norte recebem maior incidência solar ao longo do tempo, isso pode criar microclima favorável para a atividade microbiana em ambientes que preservam a umidade do solo, por exemplo, nas posições rebaixadas do relevo, comparado as demais faces Sul, Leste e Oeste.

Nas encostas, os nutrientes do solo estão constantemente sendo lixiviados e, em parte, interceptados por raízes e superfícies das argilas, em sua passagem pelas posições mais baixas na paisagem (FUJII et al., 2011). Bergstrom, Monreal e King (1998) observaram que a atividade enzimática do solo distribuiu-se de forma diferente ao longo da paisagem, sendo maior nas posições mais baixas. Ainda, de acordo com Sidari et al. (2008), nas encostas pode ser verificado menor densidade de regeneração de plantas, conseqüentemente, haverá menor teor de matéria orgânica e atividade de enzimas hidrolíticas. Comumente, posições mais baixas na topossequência, fornecem maiores fontes de C e de energia para as populações microbianas do solo e, conseqüentemente, conduzem a maior biomassa microbiana e atividade microbiana (KHALILI-RAD et al. 2011). Contudo, mais estudos tornam-se necessários para melhor compreensão dos mecanismos que regem o efeito da topografia na distribuição espacial dos atributos biológicos do solo em ecossistemas naturais.

3.1. Efeito dos períodos verão e inverno nos atributos biológicos

A média e o erro padrão da umidade do solo no período verão e inverno encontram-se na Figura 4. O teor de umidade do solo na baixada foi proporcional a precipitação no verão (fevereiro - 57,2 mm), sendo que os solos das parcelas da baixada apresentaram maiores valores ($19,87 \pm 3,60 \text{ g g}^{-1}$) comparados aos solos da encosta e do topo. No inverno, com a redução da precipitação (agosto - 2,8 mm), houve redução da umidade do solo em todos os ambientes, sendo que a baixada apresentou maiores valores de umidade ($20,02 \pm 2,56 \text{ g g}^{-1}$), seguida do topo ($13,98 \pm 0,57 \text{ g g}^{-1}$) e encosta ($6,81 \pm 0,35 \text{ g g}^{-1}$) (Figura 4). No ano estudado (2015) observa-se que choveu menos e a temperatura média foi maior comparado as normais climatológicas do período de 1950-1990 (Figura 2 - Introdução Geral).

A umidade do solo apresentou efeito do período de coleta ($p < 0,05$), sendo maior durante o verão (período mais chuvoso). Os teores de CBM foram inversamente proporcionais a umidade do solo. O CBM foi maior para a coleta do inverno (mais seco) ($p=0,01$) em todos os

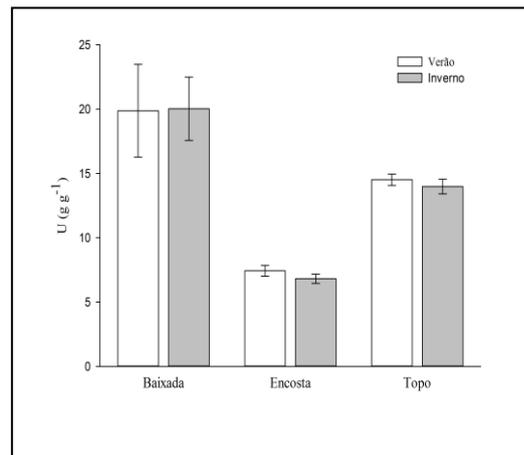


Figura 4 - Média e erro padrão da umidade das amostras de solo coletas na profundidade de 0,0-0,10 m no período verão e inverno em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil. U = umidade do solo.

ambientes ao longo do gradiente topográfico. Esses resultados são contrários aos encontrados na literatura (JAKELAITIS et al., 2008; NUNES et al., 2009), não sendo esperados. Entretanto, Rangel-Vasconcelos et al. (2005) indicam que esta relação inversa pode estar relacionada à ocorrência de nutrientes prontamente disponíveis no solo e a eventos de chuvas dias antes da amostragem (Figura 2 – Introdução Geral), estimulando o crescimento da biomassa microbiana, principalmente num período com temperatura média de 25 °C, com média das máximas de 36 °C .

Em Florestas Tropicais, as altas taxas de serapilheira somadas à redução das taxas de decomposição no período seco resultam no acúmulo de matéria orgânica do solo (VASCONCELOS et al, 2007; 2008). Ademais, os períodos secos seguidos de chuva causam estresse osmótico promovendo lise celular resultando em pulsos de liberação de nutrientes (YANG et al., 2008). A ocorrência de chuvas no inverno (período de menor disponibilidade hídrica), antes da amostragem, possivelmente, provocou pulsos de liberação de nutrientes provenientes da fração lábil da matéria orgânica e de parte da biomassa microbiana do solo que morre neste processo, isso permitiu rápido crescimento da biomassa microbiana neste período. Esses resultados estão em conformidade com outros estudos que indicam que a variação sazonal na umidade do solo está associada à variação sazonal da biomassa microbiana (LODGE; McDOWELL; McSWINEY, 1994; RANGEL-VASCONCELOS et al., 2005; 2015).

O NBM e o NMA não foram afetados pelos períodos de coleta do solo ($p > 0,05$). A RBSA foi maior na coleta do verão (período com maior disponibilidade hídrica) ($p < 0,001$) em

todos os ambientes ao longo do gradiente topográfico. Isso indica que o aumento da atividade metabólica dos microrganismos é favorecido por níveis ótimos de umidade do solo. Esses resultados corroboram com o observado por Rangel-Vasconcelos et al. (2005). Entretanto, Brechet et al. (2009) a partir de estudos em Floresta Neotropical, na Guiana Francesa, não observou esta relação, nem espacialmente e nem sazonalmente, tendo atribuído os resultados de respiração basal do solo a fatores como morte de raízes e qualidade e quantidade de serrapilheira, que tendem a fornecer grande quantidade de C lábil aos microrganismos. A respiração basal é impulsionada não somente pela disponibilidade de água, mas também por variações de luz e disponibilidade de nutrientes no solo. A biomassa microbiana é considerada eficiente quando apresenta menor taxa de respiração. Entretanto, deve ser analisada com cuidado, pois altas taxas de respiração podem ser interpretadas como características desejáveis quando se considera que a decomposição dos resíduos orgânicos disponibilizará nutrientes para as plantas (ROSCOE et al., 2006).

Os diferentes períodos de coleta afetaram o qMIC ($p = 0,05$), indicando tendência de maior acúmulo/entrada de C orgânico no solo durante o inverno. O quociente metabólico (qCO_2) apresentou alta correlação negativa com o CBM ($r = -0,79$, verão e $r = -0,86$, no inverno). Logo, baixos valores de qCO_2 no período mais seco (inverno) correspondem a maior eficiência da biomassa microbiana em imobilizar o C e nutrientes do solo, enquanto no verão (maior precipitação), os maiores valores indicam que a biomassa microbiana está mineralizando mais C do que imobilizando. Esses resultados corroboram com os resultados obtidos por Rangel-Vasconcelos et al. (2005), pois esse comportamento pode estar relacionado à alteração da comunidade microbiana do solo (relação fungo/bactéria).

A atividade da fosfatase ácida e da desidrogenase não foi afetada pelos períodos de coletas. No entanto, a atividade da β -glucosidase foi afetada pelos períodos de coleta do solo, sendo superior no período de verão ($p < 0,001$) ao longo do gradiente topográfico. Nesse período, percebe-se que a atividade metabólica dos microrganismos é maior, sendo favorecida por melhores condições de umidade e disponibilidade hídrica, somado a condições ótimas de temperatura, conseqüentemente a mineralização do C foi favorecida. Isso possivelmente está associado à labilidade e recalcitrância dos resíduos aportados nos solos (PEGORARO et al., 2011), o que determinou a composição da população dos microrganismos nas épocas distintas. Carney et al. (2007) mostraram que a elevada entrada de C derivado de raízes alterou a comunidade microbiana, aumentando a comunidade de fungos, que acarretou a maior decomposição da matéria orgânica do solo. Isso pode indicar que a decomposição do C

orgânico pode ser determinada pela composição da comunidade microbiana específica que requer uma fonte adequada de energia, entretanto carece de mais estudos para uma conclusão à respeito. De acordo com Kaiser et al. (2010), a atividade das enzimas mediadoras da decomposição da matéria orgânica do solo está ligada a composição da comunidade microbiana que pode apresentar um forte padrão sazonal.

3.2. Relação entre atributos químicos, físicos, biológicos e topográficos

Na análise parcial de Redundância (pRDA) foram utilizados os atributos químicos e físicos da profundidade 0,0-0,10 m contidos na Tabela 2 do capítulo 1, os atributos químicos e físicos (C, N, C/N e umidade do solo) da profundidade 0,0-0,10 m quantificados no verão e inverno, os atributos biológicos da Tabela 2 deste capítulo e a matriz de variáveis topográficas utilizadas no Capítulo 1.

Os resultados da análise parcial de redundância indicam que no verão, de 50,5% da variância total explicada (VTE), 36% foram explicados pela intersecção entre os atributos químicos, físicos e topográficos (Tabela 3, Figura 5). O modelo geral foi significativo (R^2 ajustado = 50,5%, $p = 0,0001$).

Tabela 3 - Resultado da análise parcial de redundância (pRDA). Atributos biológicos (B) foram usados como matriz resposta a três fontes de variação: (Q) atributos químicos, (F) atributos físicos e (T) atributos topográficos

Componente de variação	Verão		Inverno	
	R^2 ajustado	p valor	R^2 ajustado	p valor
TVE	0,505	0,0001	0,559	0,0001
Q	0,489	0,0001	0,581	0,0001
F	0,396	0,0001	0,427	0,0001
T	0,391	0,0001	0,298	0,0002
B~Q FUT	0,072	0,024	0,133	0,0001
B~F QUT	-0,007	0,597	-0,011	0,803
B~T QUF	0,026	0,082	-0,013	0,868
VN	0,494		0,440	

TVE = total de variação explicada; (~) Em função de; (U) variação combinada; (|) controlando efeito de; VN = variação não explicada.

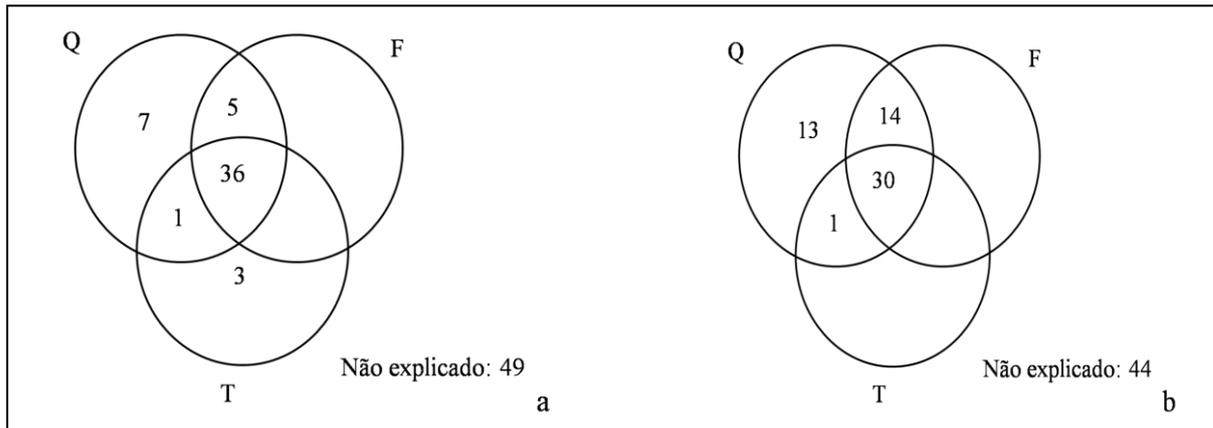


Figura 5 - Diagrama de Venn mostrando a divisão da variação dos atributos biológicos do solo relativo a três fontes: (Q) atributos químicos do solo, (F) atributos físicos e (T) variáveis topográficas em Floresta Atlântica. Valores de R^2 ajustado em %. Os valores negativos não são mostrados (em branco).

Contudo, apenas os atributos químicos, individualmente (controlando efeitos dos atributos físicos e topográficos), tiveram maior participação da variação dos atributos biológicos (R^2 ajustado = 7%, $p = 0,02$). No inverno, observou-se que dos 55,9% da variância total explicada, 30% foram explicados pela intersecção entre os atributos químicos, físicos e topográficos. O modelo geral foi significativo ($R^2 = 55,9\%$, $p = 0,0001$). Entretanto, apenas os atributos químicos, individualmente (controlando efeitos dos atributos físicos e topográficos), tiveram maior participação da variância dos atributos biológicos no inverno ($R^2 = 13\%$, $p = 0,0001$) (Tabela 3, Figura 5). Os atributos físicos e topográficos de forma individual (tendo demais efeitos controlados) não apresentaram efeito na variação dos atributos biológicos. Esses resultados indicam que os atributos biológicos são mais modificados pelos atributos químicos do solo ao longo do gradiente topográfico.

Embora, os resultados demonstrem que os atributos químicos, individualmente, expliquem a variação dos atributos biológicos ($B \sim Q|FUT$), o total de variância explicada foi significativo em ambos os períodos de coleta (verão e inverno). Dessa forma, não se pode desconsiderar o efeito dos atributos físicos e topográficos do terreno na variação dos atributos biológicos. Esses resultados levam a deduzir que as variáveis físicas e topográficas aumentam o poder explicativo das variáveis químicas em certa medida. A topografia e variação textural associadas podem afetar as taxas de decomposição, bem como transformações de nutrientes do solo (LUIZÃO et al., 2004).

De acordo com Werner e Homeier et al. (2015) há fortes limitações de nutrientes nas posições mais altas do gradiente topográfico de Florestas Tropicais, em razão da constante perda de nutrientes em direção às baixadas, alterando a ciclagem de nutrientes e a estrutura do ecossistema na paisagem. Esses fatores possivelmente envolvem oscilações na população de

microrganismos, por meio da alteração na química do solo, podendo afetar a capacidade dos mesmos em utilizar o COT, restringindo o potencial de ganhos líquidos no armazenamento de C no solo (CARNEY et al., 2007; KAISER et al., 2010).

No presente estudo foi observado no verão e no inverno, correlação positiva do COT com o CBM ($r = 0,81$; $p < 0,001$ e $r = 0,64$; $p < 0,001$, respectivamente), FA ($r = 0,81$; $p < 0,001$ e $r = 0,45$; $p < 0,05$, respectivamente), BG ($r = 0,73$; $p < 0,001$), DES ($r = 0,74$; $p < 0,001$ e $r = 0,40$; $p < 0,05$, respectivamente), RBSA ($r = 0,54$; $p < 0,01$ e $r = 0,51$; $p < 0,01$, respectivamente). O teor de cálcio trocável apresentou correlação positiva com a desidrogenase ($r = 0,67$; $p < 0,001$ e $r = 0,68$; $p < 0,001$, respectivamente) e com a fosfatase ácida ($r = 0,56$; $p < 0,01$ e $r = 0,43$; $p < 0,05$, respectivamente). O teor de P disponível apresentou correlação positiva com a atividade da fosfatase ácida no verão ($r = 0,44$; $p < 0,05$). O teor de Mg apresentou correlação positiva com a RBSA no verão ($r = 0,52$; $p < 0,01$). O pH apresentou alta correlação negativa com a elevação no verão e inverno ($r = -0,75$; $p < 0,001$ e $r = -0,75$; $p < 0,001$, respectivamente). Esses resultados indicam que as posições mais baixas na paisagem tendem a apresentar maior fertilidade química e os solos das posições elevadas apresentarem menor fertilidade química. Os solos dos topos tendem a perder nutrientes, tornando-se mais ácidos, reduzindo a participação dos atributos biológicos no solo, principalmente no que se refere à biomassa microbiana, respiração basal e a atividade enzimática. A variação na química do solo envolve contínua perda de bases trocáveis (por exemplo Ca, Mg, K) por ação das águas nos topos de morros, redistribuindo os nutrientes na paisagem e tornando esses solos mais ácidos ao longo do tempo (WERNER; HOMEIER, 2015), com alterações na ciclagem de nutrientes no solo (KAISER et al., 2010).

A variação da fertilidade dos solos nas diferentes posições na paisagem pode ter também a contribuição de minerais da fração areia mais resistente ao intemperismo indicada pela correlação positiva da fração areia fina com Ca ($r = 0,55$, $p < 0,01$); Mg ($r = 0,64$, $p < 0,001$); K ($r = 0,59$, $p = 0,001$) no solo da baixada em ambos os períodos de avaliação. De acordo com Unamba-Oparah (1985), a fração areia dos solos, pode conter flocos de muscovita e justificar a correlação das frações mais grosseiras com o suprimento de potássio para a solução do solo. A baixa relação da fração argila com o suprimento de nutrientes está associada ao avançado estágio de intemperismo dessa fração, sem grandes reservas de cátions básicos.

De acordo com Khalili-Rad et al. (2011), ao investigar o efeito de encosta nas propriedades bioquímicas e microbiológicas do solo em uma topossequência, descobriram que os maiores

valores de C orgânico, N total, N inorgânico, N mineralizável anaerobicamente, N da biomassa microbiana, respiração basal do solo e atividade enzimática ocorreram na base do declive. Outros autores encontraram correlação positiva entre atributos químicos do solo com os atributos biológicos, sugerindo maior participação desses atributos na variação dos atributos biológicos do solo (GRÉGGIO; NAHAS, 2007, CARNEY et al., 2007, CONTE; ANGHINONI; RHEINHEINER, 2002).

Estudo de Dkhar e Mishra (1983) indicou maiores teores de Ca, Mg, K e COT no solo associados aos altos valores de atividade da desidrogenase no solo. Outros estudos sugerem correlação positiva entre o teor de COT e a atividade enzimática dos solos (NUNES et al., 2009; CARNEIRO et al., 2008). Esses resultados indicam a importância de se conhecer a relação solo-paisagem, principalmente no que tange a atividade biológica do solo, a fim de estabelecer medidas estratégicas para conservação e restauração ambiental de ecossistemas já fragilizados, bem como promover o uso e manejo sustentável dos recursos naturais em clima tropical. É sabido que os ciclos sazonais das plantas podem alterar o C e N do solo, bem como a disponibilidade da população microbiana a fim de se alimentarem da matéria orgânica do solo e da disponibilidade de N para as plantas (KAISER et al., 2010). Neste sentido, medidas que envolvam a implantação de espécies que proporcionem menor relação C/N podem auxiliar na maior atividade microbiana do solo e maximizar a ciclagem de nutrientes no ambiente (VASCONCELLOS et al., 2013).

4. CONCLUSÕES

A declividade condicionou a heterogeneidade dos atributos biológicos do solo na topossequência de floresta em regeneração no bioma Floresta Atlântica no sul do Espírito Santo.

O C da biomassa microbiana (CBM), a respiração basal (RBSA), o quociente microbiano (qMIC), o quociente metabólico (qCO₂) e a atividade da β-glucosidase foram afetados pela sazonalidade.

Os atributos biológicos foram modificados pelos atributos químicos do solo ao longo do gradiente topográfico de floresta em regeneração no bioma Floresta Atlântica.

Maiores teores de carbono orgânico total, cálcio e magnésio trocáveis e fósforo disponível nos solos correlacionaram-se positivamente com a atividade enzimática.

5. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. M. et al. Análise de agrupamentos em remanescente de Floresta Estacional Decidual. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 781-789, jul./set., 2015.
- ALVARES, C. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Fast Track, p.1-18, 2013.
- ALVES, T. S. et al. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 341-347, 2011.
- ANDERSON, T.H.; DOMSCH, K.H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, p. 393-395, 1993.
- BADIANE, N. N. Y. et al. Use of soil enzymes activities to monitor soil quality in natural and improve fallows in semi-arid tropical regions. **Applied Soil Ecology**, v. 18, p. 229-238, 2001.
- BALOTA, E. L. et al. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 641-649, 1998.
- BARRETO, P. A. B. et al. Mineralização de nitrogênio e carbono em solos sob plantações de eucalipto, em uma sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.3, Viçosa, 2010.
- BASNET, K. Effect of topography on the pattern of trees in Tabonuco (*Dacryodes excels*) dominated rain forest of Puerto Rico. **Biotropica**, v. 24, p. 31-42, 1992.
- BERGSTROM, D.; MONREAL, C.; KING, D. Sensitivity of soil enzyme activities to conservation practices. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, p.1286–1295, 1998.
- BLANCHET, F. G.; LEGENDRE, P.; BORCARD, D. Forward selection of explanatory variables. **Ecology**, v. 89, n.9, p. 2623-2632, 2008.
- BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. Numerical Ecology with R. Springer, New York, 2011. 306 p.
- BORGES, C. D. et al. Biomassa microbiana do solo em fitofisionomias no sul de Mato Grosso do Sul. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, vol. XIII, n. 1, p. 51-62, 2009.
- BRECHET, L. et al. Do tree species characteristics influence soil respiration in tropical forests? A test based on 16 tree species planted in monospecific plots. **Plant Soil**, v. 319, p. 235–246, 2009.
- BURNS, R. G. et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 58, p. 216-234, 2013.

CAMPOS, M. C. C. et al. Topossequência de solos na transição Campos Naturais-Floresta na região de Humaitá, Amazonas. **Acta Amazônica**, v. 42, n.3, p. 387-398, 2012.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Minas Gerais. p. 375-470, 2007.

CARDOSO, E. L. et al. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em pastagem cultivada e nativa no Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 631-637, 2009.

CARNEIRO, M. A. C. et al. Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana do solo em duas cronosseqüências de reabilitação após a mineração de bauxita. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 621-632, 2008.

CARNEY, K. M. et al. Altered soil microbial community at elevated CO₂ leads to loss of soil carbon. **Proceedings of the National Academy of Sciences, USA**, v. 104, p. 4990-4995. 2007.

CARVALHO, A. M. X. et al. Atividade microbiana de solo e serapilheira em áreas povoadas com *Pinus elliottii* e *Terminalia ivorensis*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2709-2716, 2008.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 925-930, 2002.

CREMON, C. et al. Atributos do solo em diferentes fitofisionomias do Cerrado Matogrossense. **Agrarian**, v. 2, n.6, p. 47-59, out./dez. 2009.

CUNHA, G. M. et al. Biomassa e estoque de carbono e nutrientes em Florestas Montanas da Floresta Atlântica da região norte do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1175-1185, 2009.

DE SCHRIJVER, A. et al. Tree species traits cause divergence in soil acidification during four decades of post agricultural forest development. **Global Change Biology**, v.18, p. 1127-1140, 2011.

DENG, S.; POPOVA, I. Carbohydrate Hydrolases. In: DICK, R. P., (Ed.). **Methods of Soil Enzymology**. Madison, Soil Science Society of America, 2011. p.185-208, Chapter 9, (Special Publication, 9).

DICK, G.; SCHUMACHER, M. V. Relações entre solo e fitofisionomias em florestas naturais. **Ecologia e Nutrição Florestal**, Santa Maria-RS, v. 3, n. 2, p. 31-39, mai./ago., 2015.

DICK, R. P.; BURNS, R. G. A. Brief history of soil enzymology research. In: Dick, R.P. (Ed.), **Methods of Soil Enzymology**. Madison, **Soil Science Society of America**, 2011. p.1-19. Inc., Madison, Wisconsin, USA.

DKHAR, M. S.; MISHRA, R. R. Dehydrogenase and urease activities of maize (*Zea mays* L.) field soils. **Plant and Soil**, v. 70, p. 327-333, 1983.

DRAY, S., BLANCHET, F. G., LEGENDRE, P. 2013. Packfor: Forward selection with permutation (Canoco p. 46). R package version 0.0-8/r109. <<http://R-Forge.R-project.org/projects/sedar>>

DUBUIS, A. et al. Improving the prediction of plant species distribution and community composition by adding edaphic to topo-climatic variables. **Journal of Vegetation Science**, v. 24, p. 593–606, 2012.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solos / organizadores, Guilherme Kangussú Donagema... [et al.]. — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Documentos / Embrapa Solos)

ESRI. ArcGIS for Windows Version 10.3. Licence type ArcInfo. [S.I]: ESRI – Environmental Systems Research Institute, 2015.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campo Grande, v. 2, p. 6-16, 1998.

FERREIRA, E. A. B. et al. Influência de variações ambientais sobre o fluxo de CO₂ em solos sob campo limpo úmido no cerrado. In: IX Simpósio nacional do cerrado: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais, 2008, Brasília-DF. **Simpósio nacional do Cerrado**, p. 3, 2007.

FISCH, G. et al. The convective boundary layer over pasture and forest in Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 47–59, 2004.

FISK, M. C.; SCHMIDT, S. K.; SEASTEDT, T. R. Topographic patterns of above and belowground production and nitrogen cycling in alpine tundra, **Ecology**, v. 79. p. 2253-2266, 1998.

FRANCHINI, J. C. et al. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 92, n. 1-2. p. 18-29, 2007.

FUJII, K. et al. Acidification of tropical forest soils derived from serpentine and sedimentary rocks in East Kalimantan, Indonesia. **Geoderma**, v. 160, n. 3, p. 311-323, 2011.

GREGGIO, T. C.; NAHAS, E. Atividade enzimática do solo sob dois fragmentos florestais. **Científica**, Jaboticabal, v. 35, n. 2, p.179 - 187, 2007.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. MAPAS DE BIOMAS E DE VEGETAÇÃO. 2004. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>>. Acesso: 02/03/16.

IEMA. Parque Estadual Mata das Flores. 2016. Disponível em <<http://www.meioambiente.es.gov.br/>>. Acesso em 10 de março 2016.

- JAKELAITIS, A. et al. Qualidade da camada superficial de solo sob floresta, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 38, n. 2, p. 118-127, jun. 2008.
- KAISER, C. et al. Belowground carbon allocation by trees drives seasonal patterns of extracellular enzyme activities by altering microbial community composition in a beech forest soil. **New Phytologist**, v. 187, p.843–858, 2010.
- KEENEY, D. R.; NELSON, D. W. Nitrogen inorganic forms. In: Page, A. L. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 2.* Madison: American Society of Agronomy, p.643-698. 1982.
- KHALILI-RAD, M. et al. The effects of slope position on soil biological properties in an eroded toposequence. **Arid Land Research and Management**, v. 25, p. 308–312, 2011.
- KOSUGI, Y. et al. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 147, p.35–47, 2007.
- KUMARI, K. K.; SINGARAM, P. Relationship among soil chemical, biochemical properties and enzyme activities. **The Madras Agricultural Journal**, v. 82, p. 69-70, 1995.
- LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. F. *Numerical ecology*, v. 24, Elsevier, 2012.
- LIU, W. et al. Interannual variability of soil microbial biomass and respiration in responses to topography, annual burning and N addition in a semiarid temperate steppe. **Geoderma**, v.158, p.259–267, 2010.
- LODGE, D. J.; McDOWELL, W. H.; McSWINEY, C. P. The importance of nut pulses in tropical forests. **TREE**, v. 9, n. 10, 1994.
- LOPES, E. L. N. et al. Microbial biomass and soil chemical properties under different land use systems in northeastern Pará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.4, Viçosa, jul./aug., 2011.
- LUIZÃO, R. C. C. et al. Variation of carbon and nitrogen cycling processes along a topographic gradient in a central Amazonian forest. **Global Change Biology**, v. 10, p. 592–600, 2004.
- MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.
- MARCHIORI JÚNIOR, M.; MELO, W. J. Carbono, carbono da biomassa microbiana e atividade enzimática em um solo sob Floresta natural, pastagem e cultura do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 257-263, 1999.
- MARTIN, J. G.; BOLSTAD, P. V. Variation of soil respiration at three spatial scales: components within measurements, intra-site variation and patterns on the landscape. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 41, p. 530–543, 2009.
- MATSUOKA, M.; MENDES, I. C.; LOUREIRO, M. F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 425-433, 2003.

- MENDES, I. C.; REIS JÚNIOR, F. B. Uso de parâmetros microbiológicos como indicadores para avaliar a qualidade do solo e a sustentabilidade dos agroecossistemas. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2004. 34p. (Documentos, 112)
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises**. Viçosa, UFV, 2005, 107 p.
- MOREIRA, F. M.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2006. 626p.
- NAHIDAN, S.; NOURBAKHSI, F.; MOSADDEGHI, M. R. Variation of soil microbial biomass C and hydrolytic enzyme activities in a rangeland ecosystem: are slope aspect and position effective? **Archives of Agronomy and Soil Science**, 2014. Doi: 10.1080/03650340.2014.958819
- NUNES, L. A. P. L. et al. Impacto do monocultivo de café sobre os indicadores biológicos do solo na zona da mata mineira. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2467-2474, dez, 2009.
- NANNIPIERI, P.; KANDELER, E.; RUGGIERO, P. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. In: Burns RG, Dick RP, (Ed.). **Enzymes in the environment: activity, ecology, and application**. New York (NY): Marcel Dekker, p.1–33, 2002.
- OKSANEN, J. et al. 2016. Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.3-5. <<http://CRAN.R-project.org/package=vegan>>.
- ORCHARD, V.; COOK, F.J. Relationship between soil respiration and soil moisture. **Soil Biology Biochemistry**, v.15, p.447-453, 1983.
- OSONO, T.; TAKEDA, H. Accumulation and release of nitrogen and phosphorus in relation to lignin decomposition in leaf litter of 14 tree species. **Ecological Research**, v.19, p. 593–602, 2004.
- PARRON, L. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; PRADO, C. L. C. Mineralização de nitrogênio e biomassa microbiana em solos de Mata de Galeria: efeito do gradiente topográfico. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 88).
- PEGORARO, R. F. et al. Fenóis derivados da lignina, carboidratos e amino-açúcares em serapilheira e solos cultivados com eucalipto e pastagem. **Revista Árvore**, v. 35, n. 2, Viçosa, mar./apr, 2011.
- PETRY, H. B. et al. Qualidade biológica do solo de sistemas de cultivo em pomares de *Citrus deliciosa*. **Ciência e Natura**, v. 34.1, p. 63-79, 2012.
- R CORE TEAM (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org/>.

RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T. et al. Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana de um solo sob vegetação secundária de diferentes idades na Amazônia Oriental, **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, n. 44, p. 49-73, jul./dez., 2005.

RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T. et al. Effect of water availability on soil microbial biomass in secondary forest in eastern Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 377-384, 2015.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v. 102, p. 242–254, 2009.

RHODEN, A. C. et al. Mineralização anaeróbia do nitrogênio em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p.1780-1787, nov./dez, 2006.

ROSCOE, R. et al. Biomassa Microbiana do solo: Fração mais ativa da matéria orgânica. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. (Ed.). **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, p. 163-198.

SANTOS, A. C. et al. Gênese e classificação de solos numa topossequência no ambiente de mar de morros do médio Vale do Paraíba do Sul, RJ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n.4, p. 1297-1314, 2010.

SANTOS, R. D. et al. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 6ª ed. Revista e Ampliada. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Embrapa Solos, 2013a. 100p.

SIDARI, M. et al. Influence of slope aspects on soil chemical and biochemical properties in a *Pinus laricio* forest ecosystem of Aspromonte (Southern Italy). **European Journal of Soil Biology**, v. 44, p. 364–372, 2008.

SILVA, C. F. et al. Carbono orgânico total, biomassa microbiana e atividade enzimática do solo de áreas agrícolas, florestais e pastagem no médio Vale do Paraíba do Sul (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p.1680-1689, 2012.

SILVEIRA, A. O. **Atividades enzimáticas como indicadores biológicos da qualidade de solos agrícolas do Rio Grande do Sul**. 2007. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. 81 p.

SPARLING, G. P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 30, p. 195-207, 1992.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R.W.; SCOTT, A.; BOTTOMELEY, P.J., eds. **Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties**. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p. 778-835. (Special Publication, 5).

TAJIK, S.; AYOUBI, S.; NOURBAKHS, F. Prediction of soil enzymes activity by digital terrain analysis: comparing artificial neural network and multiple linear regression models. **Environmental Engineering Science**, v. 29, p.798–806, 2012.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/Departamento de Solos, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

TIPPING, E. et al. Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soils, investigated by a field manipulation experiment. **Environment International**, Oxford, v. 25, p. 83-95, 1999.

TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Características biológicas do solo indicadoras de qualidade após dois anos de aplicação de biofóssido industrial e cultivo de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 1173-1184, 2007.

UNAMBA-OPARAH. The potassium status of the sandy soils of Northern Imo State, Nigeria. **Soil Science Society of America Journal**, v. 5, p. 437-445, 1985.

UNGER, M.; HOMEIER, J.; LEUSCHNER, C. Effects of soil chemistry on tropical forest biomass and productivity at different elevations in the equatorial Andes. **Oecologia**, v. 170, p.263–274, 2012.

VASCONCELLOS, R. L. F. et al. Nitrogênio, carbono e compactação do solo como fatores limitantes do processo de recuperação de matas ciliares. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1164-1173, 2013.

VASCONCELOS, S. S. et al. Effects of seasonality, litter removal and dry-season irrigation on litterfall quantity and quality in eastern Amazonian forest regrowth, Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v. 24, p. 27-38, 2008.

VASCONCELOS, S. S. et al. Leaf decomposition in a dry season irrigation experiment in Eastern Amazonian forest regrowth. **Biotropica**, v. 39, p. 593-600, 2007.

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York, 2002. Viçosa, UFV, 2005, 107 p.

WERNER, F. A.; HOMEIER, J. Is tropical montane forest heterogeneity promoted by a resource-driven feedback cycle? Evidence from nutrient relations, herbivory and litter decomposition along a topographical gradient, **Functional Ecology**, v. 29, n. 3, p. 430-440, 2015.

WILCOXON, F. Individual comparisons by ranking methods. **Biometrics Bull**, v. 1, p. 80-83, 1945.

YANG, Y. et al. Photosynthesis characteristics of three species of forages in the arid-hot valleys. **Wuhan University Journal of Natural Sciences**. v. 13, n. 3, p. 309-316, 2008.

ZAIA, F. C. et al. Carbon, nitrogen, organic phosphorus, microbial biomass and N mineralization in soils under cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 86, p. 197–212, 2012.

CAPÍTULO 3

RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS DO SOLO E ESPÉCIES ÁRBOREO-ARBUSTIVAS DE SUB-BOSQUE EM TOPOSSEQUÊNCIA DE FLORESTA ATLÂNTICA NO SUL DO ESPÍRITO SANTO

Resumo

A heterogeneidade dos atributos do solo depende da dinâmica da paisagem, bem como de processos de drenagem, erosão e deposição de sedimentos. A combinação entre esses fatores é capaz de influenciar o desenvolvimento e distribuição das plantas. A topografia é considerada a variável mais importante na distribuição espacial e na estrutura das florestas tropicais. O objetivo deste estudo foi analisar a relação solo-vegetação a partir de atributos químicos, físicos e biológicos do solo e espécies de sub-bosque em gradiente topográfico de fragmento de Floresta Atlântica no sul do Espírito Santo. O estudo foi realizado no Parque Estadual Mata das Flores, município de Castelo, Espírito Santo, Brasil. As parcelas foram alocadas em um transecto de 750 metros ao longo de gradiente topográfico que varia de 100 m a 180 m de altitude, dispostas em pares distantes 10 metros entre si e a distância entre os pares variando de 20 a 25 m. Realizou-se a caracterização química e física do solo nas profundidades 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. A caracterização dos atributos biológicos foi realizada na profundidade de 0,0-0,10 m em duas épocas do ano, verão (fevereiro/2015) e inverno (agosto/2015). Todos os indivíduos arbóreo-arbustivos com DAP entre 0,01 m e 0,1 m, nas parcelas da área de estudo, foram amostrados e agrupados em táxons, cada táxon representando uma espécie. Para análise estatística utilizou-se como método de ordenação o Escalonamento Multidimensional Não Métrico (NMDS, *nonmetric multidimensional scaling*). Os resultados indicaram que os solos da baixada, com melhor fertilidade química natural, correlacionaram-se com *Actinostemon concolor*, *Guapira opposita*, *Sorocea bonplandii*, Fabaceae, *Sarcaulus brasiliensis* e *Rauia resinosa*. No verão, as espécies *Actinostemon concolor*, *Guapira opposita*, *Rauia resinosa*, *Sorocea bonplandii* e *Sarcaulus brasiliensis* correlacionaram-se com maior atividade da fosfatase ácida, desidrogenase, teores de CBM e NBM do solo nas parcelas da baixada. No inverno não foi verificada correlação dos atributos do solo com a vegetação no fragmento de Floresta Atlântica no sul do Espírito Santo.

Palavras-chave: Enzimas do solo. Relação solo-vegetação. Atividade microbiana. Topografia. Ciclagem de nutrientes.

CHAPTER 3

RELATIONSHIP BETWEEN SOIL AND ATTRIBUTES OF SPECIES OF TREE AND SHRUB UNDERSTORY IN FOREST TOPOSEQUENCE ATLANTIC IN THE SOUTH OF ESPÍRITO SANTO

Abstract

The heterogeneity of the soil depends on the attributes of the dynamic scenery as well as drainage processes, erosion and deposition of sediments. The combination of these factors can influence the development and distribution of plants. The topography is considered the most important variable in the spatial distribution and structure of tropical forests. The aim of this study was to analyze the soil-vegetation relationship from chemical, physical and biological soil and species of understory in topographic gradient Atlantic Forest fragment in the south of the Espírito Santo. The study was conducted in the Mata das Flores State Park, Castelo municipality, Espírito Santo, Brazil. The plots were allocated in a transect of 750 meters along the topographic gradient ranging from 100 m to 180 m altitude, arranged in pairs 10 meters distant from each other and the distance between the pairs ranging from 20 to 25 m. There was the chemical and physical soil depths from 0.0 to 0.10 m and 0.10-0.20 m. The characterization of the biological attributes was held at 0.0-0.10 m layer in two seasons, summer (February/2015) and winter (August/2015). All trees and shrubs with DBH between 0.01 m and 0.1 m, in the portions of the study area, were sampled and grouped into taxa, each taxon representing a species. Statistical analysis was used as a sorting method the Multidimensional Scaling Not Metric (NMDS, nonmetric multidimensional scaling). The results indicated that the lowered soils, with better natural chemical fertility, correlated with *Actinostemon concolor*, *Guapira opposita*, *Sorocea bonplandii*, *Guapira opposita*, Fabaceae, *Sarcaulus brasiliensis* and *Rauia resinosa*. In summer, species *Actinostemon concolor*, *Guapira opposita*, *Rauia resinosa*, *Sorocea bonplandii*, *Guapira opposite* and *Sarcaulus brasiliensis* correlated with increased activity of acid phosphatase, dehydrogenase, CBM content and soil NBM in the lowered of installments. In winter it was not verified correlation of soil properties with vegetation in the Atlantic Forest fragment in the south of the Espírito Santo.

Keywords: Soil enzymes. Soil-vegetation relationship. Microbial activity. Topography. Nutrient cycling.

1. INTRODUÇÃO

A Floresta Atlântica é considerada um *hotspot* para a conservação mundial, ou seja, uma das áreas mais ricas em biodiversidade e mais ameaçadas do planeta, sendo considerada Reserva da Biosfera pela Unesco e Patrimônio Nacional, na Constituição Federal de 1988. Originalmente este bioma abrangia 1.315.460 km² em 17 estados brasileiros. (INPE, 2015; SOS MATA ATLÂNTICA, 2015). Atualmente, a Floresta Atlântica constitui-se de pequenos fragmentos florestais (menores que 100 ha) e ecossistemas associados, sendo que os poucos fragmentos grandes são encontrados em locais onde o terreno íngreme dificulta a ocupação humana (SILVA et al., 2007). No Estado do Espírito Santo restam aproximadamente 10,5% de fragmentos florestais e apesar da redução desse bioma, estima-se que a Floresta Atlântica abriga aproximadamente 20 mil espécies de plantas, sendo 8 mil endêmicas (INPE, 2015; SOS MATA ATLÂNTICA, 2015).

Informações sobre a relação solo-vegetação em refúgios florestais são imprescindíveis para a conservação desses ecossistemas, em face da alta fragilidade que apresentam e do potencial para manutenção de serviços ambientais, por exemplo, conservação da biodiversidade, ciclagem de nutrientes, recarga de aquíferos e proteção do solo (ROVEDDER et al., 2014).

É importante ressaltar que o sub-bosque representa um extrato da floresta altamente rico em espécies e contribui expressivamente para diferentes processos ecossistêmicos de comunidades vegetais (HUO; FENG; SU, 2014). Dentre o grupo de plantas do sub-bosque, encontram-se as espécies subordinadas às espécies de dossel, com menor estatura e menor biomassa, e seu crescimento é afetado pelas espécies dominantes (GRIME, 1998). As espécies subordinadas afetam os organismos do solo e suas interações, bem como o funcionamento do ecossistema. De acordo com Mariotte et al. (2013), as espécies de plantas subordinadas podem modificar comunidades microbianas do solo, e consequentemente, alterarem a taxa de decomposição da serrapilheira, a respiração do solo e afetar a disponibilidade de N do solo.

As múltiplas interações entre fatores ambientais e as respectivas respostas das plantas resultam em uma notável heterogeneidade ambiental que determina a formação de um mosaico de habitats, cujas peças podem se repetir no espaço e no tempo (MACHADO et al., 2008). Nesse processo, o solo e a vegetação apresentam-se fortemente relacionados, portanto há dificuldade em identificar relações de causa e efeito. Enquanto o solo fornece suporte, como umidade e nutrientes, para o crescimento e desenvolvimento da comunidade vegetal, por outro lado, a vegetação proporciona proteção para o solo, suprime a erosão e promove a

manutenção dos nutrientes no solo por meio do acúmulo e posterior decomposição da serrapilheira (ciclagem de nutrientes). Assim, os processos de ciclagem nos ecossistemas florestais afetam a variação espacial dos nutrientes do solo na área florestal (ENI; IWARA; OFFIONG, 2012; FINZI; BREEMEN; CANHAM, 1998).

A matéria orgânica do solo (MOS) é um complexo dinâmico, que é sintetizado e degradado pela atividade enzimática microbiana (BURNS et al., 2013). O equilíbrio entre esses processos determina as entradas e saídas de carbono orgânico no sistema, e também contribuem para a estrutura e estabilização dos agregados do solo (SIX et al., 2006), aumento da disponibilidade de nutrientes para as plantas, favorece a retenção de água e manejo do solo (POWLSON et al., 2011), promovendo diversidade e a atividade microbiana, e várias outras propriedades enzimáticas que determinam a fertilidade do solo, bem como o desenvolvimento e distribuição das plantas (ALLISON et al., 2007; NUNES et al., 2009; SHAW; BURNS, 2006).

As enzimas do solo podem ser encontradas em forma livre na solução do solo, adsorvidas nos colóides do solo e imobilizadas na forma de complexos (TABATABAI, 1994). As enzimas extracelulares são consideradas como importante indicador da qualidade do solo em curto prazo, em razão da sua maior sensibilidade para detectar aumento ou declínio na qualidade do solo, pois essas podem ser complexadas e protegidas ao longo do tempo devido a sua associação com minerais de argila e matéria orgânica do solo. Aumentos na umidade e temperatura do solo, aumento de CO₂ atmosférico e freqüentes ciclos de umedecimento e secagem podem modificar a composição e tamanho da comunidade microbiana e promover outros impactos diretos sobre a atividade enzimática do solo (DICK et al., 2011).

Estudos que relacionam a disponibilidade de nutrientes com a dinâmica de distribuição da comunidade arbóreo-arbustiva são de grande importância para subsidiar estratégias de recomposição de espécies vegetais nos diferentes ambientes, uma vez que algumas espécies apresentam maior grau de tolerância a ambientes mais ácidos. Alguns estudos mostram a existência da íntima relação entre diversidade fitofisionômica e as propriedades do solo (BOTREL et al., 2002; BRECHET et al., 2011; CARVALHO et al., 2007; UNGER; HOMEIER; LEUSCHNER, 2012). Esses estudos indicam que as inúmeras combinações de idade do solo, química do solo e dinâmica da paisagem permitem condições limitantes de nutrientes, que, por sua vez produzem efeitos variados sobre a estrutura e função do ecossistema (TOWNSEND; ASNER; CLEVELAND, 2008).

Dentre as enzimas do solo, aquelas pertencentes ao grupo das hidrolases, como a fosfatase ácida e a β -glucosidase apresentam grande importância para reações que ocorrem nos solos, uma vez que as mesmas são responsáveis pela quebra de substratos em compostos orgânicos de baixo peso molecular de modo a facilitar sua mineralização (DICK, 2011), estando a primeira associada ao ciclo do fósforo (P) (DEFOREST et al., 2012) e a segunda ao ciclo do carbono (C) (NUNES et al., 2009). A atividade da desidrogenase está associada à oxidação biológica de compostos orgânicos, o que envolve processos de desidrogenação, podendo responder pela atividade microbiana do solo (TABATABAI, 1994).

Conforme Souza et al. (2003), a distribuição de espécies vegetais do fragmento de Floresta Semidecídua esteve associada à topografia acidentada, fertilidade, granulometria e regime hídrico dos solos. Segundo Campos et al. (2006), a distribuição de espécies florestais ao longo de um gradiente de cerradão e cerrado *sensu stricto* esteve condicionada a níveis mais altos de pH, Ca, Mg e H+Al no solo. Chen et al. (1997) avaliando a relação solo-paisagem e solo-vegetação em floresta pluvial indicaram que as propriedades do solo que diferiram os ambientes foram pH, teor de N, CTC a pH 7,0 e teores de Al, Ca, K, Mg trocáveis, sendo que os níveis de pH, Ca e Mg trocáveis aumentaram do topo para a baixada e o Al trocável esteve associado aos ambientes mais altos. Segundo Cunha et al. (2009), o balanço negativo de P, K e Ca [solo – (parte aérea + serapilheira)] indicaram que esses nutrientes são limitantes ao crescimento dos fragmentos florestais Montanos da Floresta Atlântica na região norte-fluminense.

Embora existam muitos estudos da relação solo-planta, em especial, em ambientes tropicais (CUNHA et al., 2009; FERREIRA et al., 2007; FREITAS; MAGALHÃES, 2012; RIBEIRO et al., 2009), ainda há dificuldade de se relacionar os diferentes tipos de solos com a comunidade arbóreo-arbustiva, gerando a necessidade de mais estudos para quantificar a afinidade das relações solo-vegetação e o potencial da vegetação como indicadora das condições ambientais (BRECHET et al., 2009). Os resultados desses estudos podem subsidiar estratégias para a manutenção e aproveitamento da biodiversidade de ecossistemas, em especial, no que tange a Floresta Atlântica.

O presente trabalho teve como objetivo analisar a relação solo-vegetação a partir de atributos químicos, físicos e biológicos do solo e espécies de sub-bosque em gradiente topográfico de fragmento de Floresta Atlântica no sul do Espírito Santo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em um fragmento florestal, no Parque Estadual Mata das Flores, localizado nas coordenadas 20°35'54" S e 41°10'53" W, com área aproximada de 800 ha, localizado adjacente à área urbana do município de Castelo, Espírito Santo - Brasil. A precipitação anual no município varia entre 1.500 e 2.000 mm, sendo o clima do tipo subtropical, com verão temperado, sem estação seca (Cfb), de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013).

O Parque situa-se no domínio da Floresta Atlântica (Floresta Ombrófila Densa Montana e Estacional Semidecidual (IBGE, 2004). A área é um dos últimos remanescentes florestais de Floresta Atlântica protegidos da região e é também um corredor ecológico importante ligado aos Parques Estaduais de Forno Grande e Parque Estadual da Pedra Azul, situados em áreas de maior altitude. No Parque ocorrem espécies como *Cedrela*, *Cássia*, Bromélias e Palmáceas e a fauna é composta por pacas, raposas, preguiças, ouriços e macacos-prego. O entorno imediato do Parque é constituído principalmente por propriedades rurais que cultivam cafeeiros e criam gado (IEMA, 2016).

A precipitação acumulada registrada pela estação de Alegre (20°45'S, 41°29'W; 138 m) no período de janeiro/2015 a dezembro/2015 foi de 911,2 mm, a média das temperaturas mínimas foi de 16,8 °C e a média das temperaturas máximas de 37,4 °C (Figura 2 – Introdução Geral).

2.2. Amostragem e coleta de dados

A unidade amostral consistiu de parcela de 10 m x 10 m (0,01 ha). As parcelas foram distribuídas na área do Parque de forma a garantir representatividade quanto aos tipos de ambientes, topografia e extensão da reserva. As parcelas foram alocadas em um transecto de 750 metros ao longo de um gradiente topográfico que varia de 100 m a 180 m de altitude. As parcelas foram dispostas em pares distantes 10 metros entre si e a distância entre os pares variando de 20 m a 25 m. Foram escolhidas por sorteio aleatório 25 parcelas para as coletas de amostras de solo. As coordenadas geográficas referentes ao centro de cada parcela foram detectadas com auxílio de GPS. Os dados de precipitação e temperatura anual para o ano de 2015 foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e série histórica

climática do período de 1950-1990 (ALVARES et al., 2013). Os atributos topográficos (cota altimétrica, elevação, curvatura, face de exposição, incidência solar e índice de posição topográfica) foram extraídos de um raster SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de banda única com resolução espacial de 30 m (1 arco segundo) A declividade do terreno foi medida em campo por meio de clinômetro. Cada parcela amostrada foi classificada quanto a sua posição no relevo: baixada, encosta e topo (Tabela 1). Os solos foram caracterizados, segundo Santos et al. (2013a) e Santos et al. (2013b) em Gleissolos (baixada), Argissolos Vermelho-Amarelo (encosta) e Latossolos Vermelho-Amarelo (topo). A coleta de solo para a caracterização química e física foi realizada em fevereiro de 2015, por meio da abertura de pequenas trincheiras de 0,20 m de profundidade em cada parcela, retirando-se, com auxílio de espátula, amostras de solo superficial (aproximadamente 300 g cada) com 3 repetições, nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m. Antes das coletas das amostras de solo foi feita a remoção da serapilheira presente na superfície do solo. A coleta do solo para caracterização biológica foi realizada por meio da abertura de pequenas trincheiras de 0,10 m de profundidade em cada parcela, retirando-se, com auxílio de espátula, três amostras compostas de solo obtidas a partir de três sub-amostras simples (aproximadamente 300 g cada), na profundidade de 0,0-0,10 m. Após a coleta, as amostras de solo foram homogeneizadas e acondicionadas em sacos plásticos, conduzidas ao Laboratório de Matéria Orgânica do Solo do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES).

2.3. Atributos químicos do solo

A caracterização química do solo foi realizada nas amostras de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) coletadas nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m conforme descrito em Embrapa (2011). Foram determinados o pH em água (relação 1:2,5); Acidez Potencial ($H^+ + Al^{3+}$) extraída com solução de acetato de cálcio $Ca(OAc)_2$ 0,5 mol L⁻¹ ajustada a pH 7,0 e determinada por titulação com NaOH (0,025 mol L⁻¹); K e Na trocáveis: extrator Mehlich⁻¹ e determinação por espectrofotometria de chama; P disponível: extrator Mehlich⁻¹ e determinação por colorimetria; Ca^{2+} e Mg^{2+} extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e determinação por espectrometria de absorção atômica.

Tabela 1- Descrição geral das parcelas de coleta das amostras de solo em Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil

Parcelas	Latitude	Longitude	Elevação (m)	Declividade* (%)	Relevo	OP ¹	Posição Topográfica
P15	20°36'44,28"S	41°10'06,01"W	117	-	Plano	Sul	Baixada
P15A	20°36'45,20"S	41°10'06,44"W	117	-	Plano	Oeste	Baixada
P14A	20°36'46,09"S	41°10'05,08"W	119	-	Plano	Sudoeste	Baixada
P14B	20°36'46,76"S	41°10'04,27"W	122	-	Plano	Sudoeste	Baixada
P13	20°36'47,20"S	41°10'02,66"W	126	27	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P13C	20°36'48,25"S	41°10'02,66"W	123	16	Ondulado	Oeste	Baixada
P12B	20°36'48,85"S	41°10'00,24"W	134	21	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P12C	20°36'49,24"S	41°10'00,60"W	128	31	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P11A	20°36'49,64"S	41°10'00,31"W	128	21	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P11B	20°36'49,58"S	41°09'59,03"W	143	22	Forte Ondulado	Oeste	Encosta
P11D	20°36'50,67"S	41°09'57,35"W	149	27	Forte Ondulado	Sudoeste	Encosta
P10	20°36'51,38"S	41°09'56,44"W	142	27	Forte Ondulado	Sul	Encosta
P10C	20°36'52,80"S	41°09'55,79"W	136	29	Forte Ondulado	Sul	Encosta
P9B	20°36'53,63"S	41°09'54,45"W	125	32	Forte Ondulado	Sul	Encosta
P9C	20°36'53,87"S	41°09'55,22"W	125	36	Forte Ondulado	Sul	Encosta
P8A	20°36'54,52"S	41°09'54,11"W	118	-	Plano	Sul	Baixada
P8C	20°36'54,86"S	41°09'53,51"W	118	-	Plano	Noroeste	Baixada
P7	20°36'55,28"S	41°09'51,48"W	137	29	Forte Ondulado	Noroeste	Encosta
P7A	20°36'55,73"S	41°09'52,13"W	137	28	Forte Ondulado	Oeste	Encosta
P6A	20°36'56,86"S	41°09'50,21"W	149	25	Forte Ondulado	Noroeste	Topo
P6B	20°36'56,55"S	41°09'49,00"W	171	23	Forte Ondulado	Noroeste	Topo
P6D	20°36'57,24"S	41°09'48,25"W	171	15	Ondulado	Oeste	Topo
P5A	20°36'59,19"S	41°09'47,63"W	173	7	Suave Ondulado	Sul	Topo
P5B	20°36'59,44"S	41°09'46,50"W	161	16	Ondulado	Sudeste	Topo
P4	20°36'59,84"S	41°09'45,55"W	154	24	Forte Ondulado	Sudeste	Topo

¹OP = Orientação da parcela. *Valores não medidos em campo (< 3%).

2.4. Atributos físicos do solo

A análise granulométrica foi realizada nas amostras de TFSA nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m por agitação lenta a 50 rpm por 16 horas, com agitador tipo Wagner e presença de dispersante químico NaOH 0,1 mol L⁻¹ e determinação das frações silte e argila pelo método da pipeta (ALMEIDA et al., 2013). Foi calculado o grau de flocculação (GF) (EMBRAPA, 2011). A Porosidade total foi calculada pela diferença (1-Ds/Dp) a partir dos dados da densidade do solo (Ds) e densidade de partícula (Dp). Para determinação da microporosidade (Micro) foi utilizada a mesa de tensão, conforme descrito em EMBRAPA (2011).

2.5. Atributos biológicos do solo

No laboratório, parte do solo de cada amostra para caracterização biológica foi acondicionada em saco plástico e mantida sob refrigeração de 4-6° C até o momento de serem analisadas com relação ao conteúdo em carbono da biomassa microbiana (CBM), nitrogênio da biomassa microbiana do solo (NBM), respiração basal do solo (RBSA) conforme descrito em Mendonça e Matos (2005). A relação entre CBM e COT (qMIC) foi determinada utilizando-se a equação $qMIC = CBM/COT \times 100$ (SPARLING, 1992). A atividade da fosfatase ácida (FA), β -glucosidase (BG) e desidrogenase (DES) foi determinada conforme Tabatabai (1994). Antes de proceder-se às análises, as amostras foram destorroadas e passadas por peneira de 2,0 mm de malha, retirando-se resíduos visíveis de plantas e pequenos organismos do solo.

2.6. Espécies florestais

Os dados de abundância absoluta de espécies florestais do sub-bosque utilizadas neste estudo foram extraídos do levantamento fitossociológico realizado por Hollunder et al. (2014), a partir de coletas para identificação botânica de espécies amostradas no interior das parcelas de coletas de solo. Todos os indivíduos com DAP entre 0,01 m e 0,1 m, nas parcelas de coleta de solo, foram amostrados com paquímetro analógico, para indivíduos de menor DAP ($\leq 0,05$ m), e fita métrica para indivíduos de maior DAP ($\geq 0,05$ m). O uso do paquímetro para indivíduos de menor porte se deve à perda de precisão da fita quando utilizada nesses indivíduos. Os indivíduos amostrados foram agrupados em táxons, cada táxon representando uma espécie (HOLLUNDER et al., 2014). Para compor a matriz de abundância de espécies foram consideradas apenas as espécies florestais com ocorrência acima de 30% no total de parcelas de cada ambiente amostrado (baixada, encosta e topo) (Tabela 2), uma vez que

Tabela 2 – Espécies florestais nas parcelas de baixada, encosta e topo de morro em fragmento de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil

Família/Espécies	Código	Parcelas			Família/Espécies	Código	Parcelas		
		Baixada	Encosta	Topo			Baixada	Encosta	Topo
		----- % -----					----- % -----		
Anacardiaceae/*	Ana	14	16	50	Moraceae/ <i>Sorocea bonplandii</i>	Sbo	71	33	0
Bignoniaceae/*	Big1	0	8	50	Nyctaginaceae/ <i>Guapira opposita</i>	Gop	42	8	0
Bignoniaceae/*	Big2	42	41	16	Nyctaginaceae/ <i>Guapira opposita</i> (Vell.) Reitz	Gop1	57	8	0
Bignoniaceae/*	Big3	14	50	50	Rubiaceae/ <i>Alseis floribunda</i> Schott	Afl	0	41	33
Euphorbiaceae/ <i>Actinostemon concolor</i> (Spreng.) Müll.Arg.	Aco	42	8	0	Rubiaceae/ <i>Faramea hyacinthina</i> Mart.	Fhy	28	25	50
Euphorbiaceae/ <i>Actinostemon verticillatus</i> (Klotzsch) Baill	Ave	100	100	100	Rubiaceae/ <i>Faramea martiana</i> Müll.Arg.	Fma	0	33	0
Euphorbiaceae/ <i>Pachystroma longifolium</i> (Ness) I.M. Johnst	Plo	0	33	33	Rubiaceae/ <i>Rudgea sp. nova</i>	Rud	42	25	16
Euphorbiaceae/ <i>Senefeldera verticillata</i> (Vell.) Croizat	Sve	14	58	100	Rutaceae/ <i>Almeidea rubra</i> A.St.-Hil	Aru	42	83	83
Fabaceae/*	Fab	42	0	0	Rutaceae/ <i>Neoraputia Alba</i> (Ness & Mart.)	Nal	28	66	0
Lauraceae/ <i>Urbanodendron verrucosum</i> (Nees) Mez	Uve	0	41	16	Rutaceae/ <i>Rauia resinosa</i> Nees & Mart	Rre	42	8	0
Lecythidaceae/ <i>Couratari macrosperma</i> A.C Smith	Cma	0	16	66	Salicaceae/ <i>Casearia souzae</i> R. Marquete & Mansano	Cso	0	0	50
Moraceae/ <i>Clarisia ilicifolia</i>	Cil	14	50	16	Sapotaceae/ <i>Ecclinusac.f. ramiflora</i> Mart.	Era	14	50	0
Moraceae/ <i>Naocleopsis oblongifolia</i> (Kuhlmann)	Nob	14	33	16	Sapotaceae/ <i>Sarcaulus brasiliensis</i> (A. DC.) Eyma	Sbr	42	0	0

¹ Percentual da ocorrência da espécie acima de 30% nos subconjuntos de parcelas de baixada, encosta e topo de morro; * = classificação somente em nível de família
 Fonte: Adaptado de Hollunder et al. (2014).

o interesse deste estudo está no entendimento de padrões gerais de abundância e composição e não de riqueza de espécies.

2.7. Análise estatística dos dados

Os dados utilizados neste capítulo foram pré-selecionados a partir dos resultados obtidos no capítulo 1 e 2 desta dissertação (Figura 2 e 3, Capítulo 1 e Figura 1, Capítulo 2). Utilizou-se os atributos químicos e físicos do solo (pH, P, K, Na, Ca, Mg, H+Al, Areia Fina, Silte, Argila, GF, PT e Micro) nas profundidades 0,0-0,10 m e 0,10-0,0-0,20 m. Foram utilizados os atributos biológicos do solo (CBM, qMIC, NBM, RBSA, FA, BG e DES) no verão e inverno e os atributos topográficos (Elevação e Declividade). Para a análise da interação dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo com a variação topográfica e as espécies florestais no gradiente foi utilizada a análise de Escalonamento Multidimensional Não Métrico (do termo em inglês, *NMDS - Nonmetric Multidimensional Scaling*) usando a medida de distância de Bray-Curtis em cada subconjunto de dados. Esta análise é baseada numa matriz de dissimilaridades e evita suposições de relação linear entre as variáveis e normalidade, tornando-se útil para dados ecológicos. O coeficiente de correlação foi calculado entre as matrizes de dados e posteriormente foi realizado o teste de permutação para determinar a significância ($p < 0,1$ após 5000 permutações aleatórias). A análise estatística foi realizada utilizando o software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2015), com auxílio dos pacotes Vegan (OKSANEN et al., 2016) e MASS (VENABLES; RIPLEY, 2002).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise de Escalonamento Multidimensional Não Métrico foram utilizados os subconjuntos de dados (atributos físicos e químicos do solo nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m) e (atributos biológicos no verão e inverno) com os atributos topográficos e a matriz de abundância de espécies, considerando os dois primeiros eixos fatoriais NMDS1 e NMDS2. As ordenações produzidas pelo NMDS apresentaram valor de *stress* de 22%. Considerando que o *stress* varia de 0 a 100%, o baixo valor encontrado indica que os gráficos de ordenação estão adequados para interpretação dos resultados, demonstrando um bom ajuste linear entre as distâncias das projeções das parcelas na ordenação e a similaridade florística-estrutural entre as mesmas (BORCARD; GILLET; LEGENDRE, 2011).

Na profundidade de 0,0-0,10 m, os valores de pH, P, Na, Ca, Mg, Areia Fina e Micro apresentaram correlação negativa e significativa com o NMDS1, enquanto a Declividade e Elevação apresentaram correlação positiva com NMDS1. Na profundidade de 0,10-0,20 m foi verificada correlação negativa e significativa dos valores de pH, P, Na, Ca e Mg com o NMDS1, enquanto a Declividade e Elevação apresentaram correlação positiva com o NMDS1 (Tabela 3).

Tabela 3 - Escalonamento Multidimensional Não Métrico (NMDS) das espécies florestais, atributos químicos e físicos do solo nas profundidades de 0,0-0,10 m 0,10-0,20 m em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil

Atributos	Profundidade 0,0-0,10 m				Profundidade 0,10-0,20 m			
	NMDS1	NMDS2	R ²	p valor	NMDS1	NMDS2	R ²	p valor
pH	-0,78	-0,62	0,30	0,0199	-0,78	-0,62	0,27	0,0327
P	-0,98	-0,15	0,33	0,0037	-0,87	-0,48	0,64	0,0002
K	-0,95	-0,30	0,12	0,2227	-0,91	-0,41	0,02	0,7844
Na	-0,93	-0,35	0,39	0,0007	-0,71	-0,69	0,24	0,0181
Ca	-0,99	-0,12	0,47	0,0005	-0,99	-0,05	0,44	0,0008
Mg	-0,96	-0,27	0,34	0,0119	-0,92	-0,37	0,33	0,0109
H+Al	0,57	0,81	0,15	0,1625	0,92	0,38	0,05	0,5268
Areia Fina	-0,72	0,69	0,31	0,0141	-0,98	0,19	0,15	0,1695
Silte	-0,73	0,67	0,03	0,6872	-0,85	-0,52	0,12	0,2339
Argila	0,26	0,96	0,06	0,4557	-0,69	0,71	0,05	0,5412
GF	-0,96	0,25	0,01	0,8606	-0,66	-0,74	0,09	0,3151
PT	-0,97	-0,20	0,11	0,2441	0,59	0,80	0,03	0,6480
Micro	-0,95	0,28	0,27	0,0235	-0,79	0,61	0,15	0,1427
Declividade	0,96	-0,26	0,44	0,0009	0,97	-0,21	0,46	0,0012
Elevação	0,96	0,24	0,62	0,0002	0,94	0,31	0,56	0,0002

¹Correlações > 0,7 – forte; correlação < 0,7 e > 0,5 – fraca; pH = em H₂O; P = fósforo; K = potássio; Na = sódio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; H+Al = acidez potencial; GF = grau de floculação; PT = porosidade total; Micro = microporosidade.

Os resultados indicam que a distribuição das espécies no fragmento estudado esteve correlacionada com atributos de fertilidade dos solos e topográficos, sendo que a Elevação e a Declividade também conduziram um gradiente de disponibilidade de umidade nos solos. A ordenação das espécies mostrou que a maior fertilidade química natural nas parcelas da baixada (Figura 2, Capítulo 1), que também apresentaram maiores teores de Areia Fina (Figura 3, Capítulo 1), em ambiente de menor declividade e elevação e maior estabilidade do terreno, onde predominou Gleissolos, estiveram correlacionadas à abundância das espécies Aco (*Actinostemon concolor*), Gop (*Guapira opposita*), Sob (*Sorocea bonplandii*), Gop1 (*Guapira opposita*), Fab (espécie da família Fabaceae), Sbr (*Sarcaulus brasiliensis*), Rre (*Rauia resinosa*) (Figura 1, a e b).

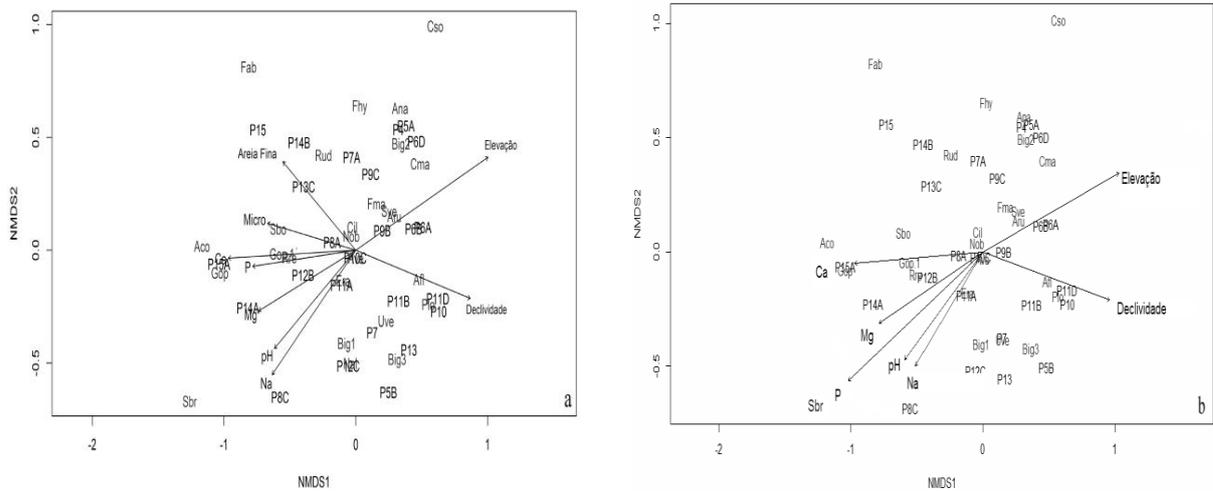


Figura 1 – Análise de Escalonamento Multidimensional Não Métrica (NMDS1 e NMDS2) das espécies florestais, atributos químicos e físicos do solo na profundidade de 0,0-0,10 m (a) e 0,10-0,20 m (b) em gradiente topográfico de Floresta Atlântica. Vetores representam atributos químicos, físicos do solo e topográficos. Micro = microporosidade; P = fósforo; Ca = cálcio; Mg = magnésio; pH = pH em H₂O; Na = sódio. Plotagem somente dos atributos com significância $p < 0,1$. Total de 25 parcelas de acordo com a Tabela 1. Abreviaturas das espécies de acordo com a Tabela 2. $Stress=0,22$.

Esse comportamento dos dados indica que essas espécies podem ser consideradas tolerantes à saturação hídrica periódica impressa por condições de hidromorfismo que predominaram nas parcelas da baixada. Assim destaca-se que, essas espécies requerem condições de maior umidade e disponibilidade de nutrientes do solo para seu crescimento e desenvolvimento. Entre as espécies observadas nas parcelas da baixada, *Actinostemon concolor*, *Guaripa opposita* e *Sarcaulus brasiliensis* ocorrem naturalmente em matas ciliares (ANDRADE et al., 2006; GAMA et al., 2003; SCHIMMELPFENNIG; PERIN; ARMILIATO, 2009). As parcelas da baixada podem corresponder ao que Cardoso e Schiavini (2002) indicaram como áreas depressionárias, com inundações periódicas e acúmulo de sedimentos que atuam na distribuição das espécies adaptadas, conferindo-lhes condições de predomínio.

Carvalho et al. (2005) verificaram que os atributos do solo e a declividade afetaram a distribuição das espécies indicadoras em área de Floresta Ripária do Rio São Francisco em Três Marias, MG, Brasil. Esses autores verificaram forte influência da drenagem e fertilidade química dos solos, sugerindo que a disponibilidade de água e de nutrientes minerais são as principais variáveis ambientais que determinaram a distribuição das espécies na floresta.

As espécies *Sorocea bonplandii* e *Guapira opposita*, identificadas nas parcelas da baixada, são amplamente encontradas em Florestas Estacionais Semidecíduas (FERREIRA JUNIOR et al., 2007). Além disso, a ocorrência de espécie da família Fabaceae nas parcelas da baixada pode aumentar a disponibilidade de N no solo nesse ambiente. A capacidade de fixação biológica de N é atribuída a muitas espécies dessa família, principalmente em solos com

menor quantidade de nutrientes minerais e degradados (LODWIG et al., 2003; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Em contrapartida, nas parcelas do topo, representando ambiente com menores teores de nutrientes minerais e de maior acidez do solo, além de exibirem melhor drenagem e predominância dos Latossolos (Capítulo 1) foi observado maior abundância das espécies Ana (espécie da família Anacardiaceae) Big2 (espécie da família Bignoniaceae), Cma (*Couratari macrosperma*) e Cso (*Casearia souzae*) (Figura 1, a e b). Esses resultados indicaram a tolerância dessas espécies para condições de menor disponibilidade de água e nutrientes como aquelas verificadas no topo de morro. Segundo Botrel et al. (2002), certas espécies da família Anacardiaceae, por exemplo, *Tapirira obtusa* e *Tapirira guianensis*, apresentam ampla extensão de habitats preferenciais, ou seja, a alta densidade e ampla distribuição dessas espécies justifica-se pelo seu caráter generalista, sendo suas ocorrências relatadas em ambientes de condições intermediárias de drenagem e fertilidade química em topossequência de Floresta Estacional Semidecidual em Ingaí, MG.

As parcelas da encosta apresentaram maior declividade, conseqüentemente, menor estabilidade do terreno pela ação das águas. Nesse ambiente, houve predomínio de Argissolos e condição química e física do solo intermediária entre o topo e a baixada. Houve correlação às espécies Afl (*Alseis floribunda*), Plo (*Pachystroma longifolium*), Uve (*Urbanodendron verrucosum*), Big3 (espécie da família Bignoniaceae) (Figura 1, a e b). Dentre as espécies identificadas na encosta destaca-se a *Alseis floribunda*, espécie arbórea, de comportamento perenifólio, com ocorrência em encostas de solos úmidos, de textura argilosa e de boa drenagem (CARVALHO, 2010).

A influência da umidade e fertilidade dos solos na distribuição de espécies arbóreas e arbustivas em florestas tropicais tem amplo subsídio na literatura (ALMEIDA JUNIOR et al., 2009; CAMARGOS et al., 2008; MARCON et al., 2014; RUGGIERO et al., 2006; SCIPIONI et al., 2012).

De acordo com Puig (2008) é possível distinguir grupamentos vegetais a partir da relação com maior ou menor saturação hídrica no solo, uma vez que, formações florestais que se desenvolvem em ambiente de saturação permanente ou temporária do solo, apresentam-se distintas na composição florística e estrutura, comparadas as espécies que apresentam preferência por solo de boa drenagem.

Em relação à atividade biológica, no verão houve correlação negativa e significativa do CBM ($p < 0,05$), NBM ($p < 0,05$), FA ($p < 0,05$), DES ($p < 0,1$) com o NMDS1, enquanto a declividade apresentou correlação positiva e significativa ($p < 0,01$) com o NMDS1. No inverno, somente a declividade apresentou correlação positiva e significativa ($p < 0,01$) com o NMDS1 e não houve correlação dos atributos biológicos do solo com a vegetação, conforme indicado na Tabela 4.

Tabela 4 - Escalonamento Multidimensional Não Métrico (NMDS) das espécies florestais, atributos biológicos do solo no verão e inverno, em gradiente topográfico de Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil

Atributos	Verão				Inverno			
	NMDS1	NMDS2	R ²	p valor	NMDS1	NMDS2	R ²	p valor
CBM	-0,75	0,65	0,23	0,0511	-0,58	0,80	0,09	0,3487
qMIC	-0,16	0,98	0,06	0,4725	-0,34	-0,93	0,14	0,1835
NBM	-0,99	-0,12	0,25	0,0431	-0,73	0,68	0,13	0,2103
RBSA	-0,87	-0,49	0,06	0,4661	-0,68	0,72	0,10	0,3037
FA	-0,99	0,09	0,30	0,0206	-0,94	0,32	0,13	0,2067
BG	-0,45	0,89	0,08	0,3581	-0,96	0,24	0,07	0,4381
DES	-0,84	0,53	0,24	0,0493	-0,99	-0,10	0,15	0,1445
Declividade	0,97	-0,24	0,41	0,0022	0,96	-0,26	0,44	0,0010

¹Correlações $> 0,7$ – forte; correlação $< 0,7$ e $> 0,5$ – fraca; CBM = carbono da biomassa microbiana; qMIC = quociente microbiano; NBM = nitrogênio da biomassa microbiana; RBSA = Respiração basal do solo acumulada; FA = fosfatase ácida; BG = β -glucosidase; DES = desidrogenase.

Esses dados indicam que os ambientes avaliados apresentaram características distintas de topografia, o que afetou o nível do lençol freático e conseqüentemente a umidade do solo ao longo do gradiente topográfico, conseqüentemente, afetou a atividade biológica do solo e suas composições florísticas também diferiram. A ordenação das espécies no verão, período de maior disponibilidade hídrica (Figura 2, Introdução Geral), indica que as espécies Aco (*Actinostemon concolor*), Gop1 (*Guapira opposita*), Fab (espécie da família Fabaceae), Rre (*Rauia resinosa*), Sob (*Sorocea bonplandii*), Gop (*Guapira opposita*), Sbr (*Sarcaulus brasiliensis*) correlacionaram-se com maior atividade enzimática da FA e DES, e também com maiores teores de CBM e NBM do solo nas parcelas da baixada (Figura 2a).

No outro extremo, nas parcelas de encosta, ambiente de maior declividade, verificou-se que as espécies Afl (*Aleis floribunda*), Uve (*Urbanodendron verrucosum*), Plo (*Pachystroma longifolium*), Nal (*Neoraputia Alba*), Big1 (espécie da família Bignoniaceae) apresentaram-se correlacionadas aos menores teores de CBM, NBM, FA e DES (Figura 2a).

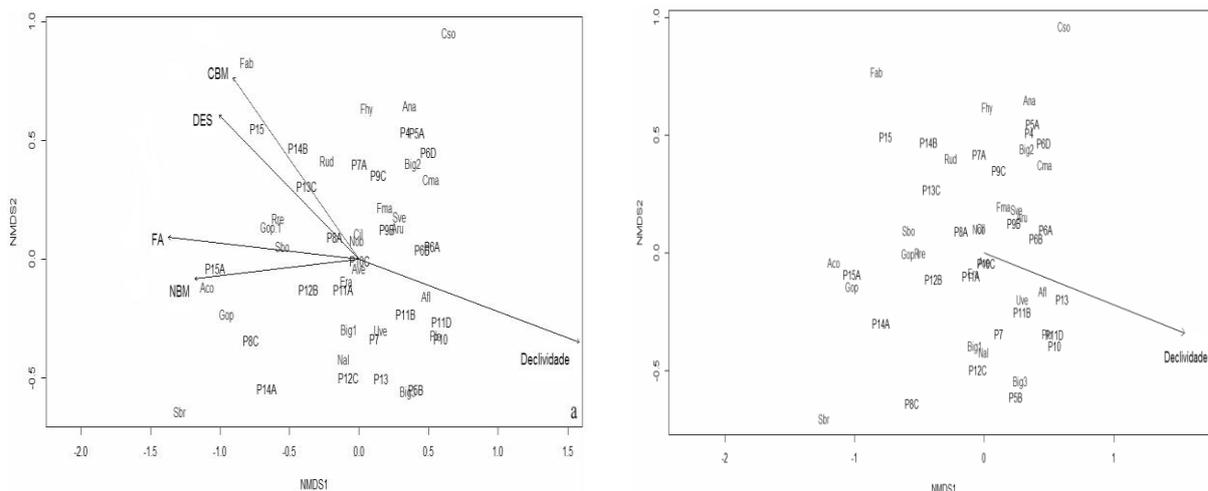


Figura 2 – Análise de Escalonamento Multidimensional Não Métrico (NMDS1 e NMDS2) das espécies florestais, atributos biológicos no verão (a) e inverno (b), em gradiente topográfico de Floresta Atlântica. Vetores representam atributos biológicos do solo e topográficos. CBM = carbono da biomassa microbiana; DES = desidrogenase; FA = fosfatase ácida; NBM = nitrogênio da biomassa microbiana. Plotagem somente dos atributos com significância $p < 0,1$. Total de 25 parcelas de acordo com a Tabela 1. Abreviaturas das espécies de acordo com a Tabela 2. *Stress* = 0,22.

Nas parcelas do topo foi verificado a ocorrência das espécies *Cso* (*Casearia souzae*), *Ana* (*Anacardiaceae*) e *Fhy* (*Faramea hyacinthina*) promovendo condição intermediária entre encosta e baixada para a atividade biológica no topo de morro, no período verão (Figura 2a).

Esses resultados indicam que as parcelas da encosta e do topo de morro permitiram a sobrevivência de espécies adaptadas a condições de melhor drenagem e menor disponibilidade de nutrientes nos solos. Comumente, essas parcelas representam áreas instáveis pela ação das águas, onde os nutrientes estão constantemente sendo lixiviados do topo em direção as baixadas, sendo parte deles interceptados pelas argilas e raízes das plantas nas posições mais baixas na paisagem, isso também refletiu numa menor atividade biológica nesses ambientes. Ademais, nas encostas verifica-se menor densidade de regeneração de plantas, conseqüentemente haverá menor teor de matéria orgânica, menor biomassa microbiana e atividade de enzimas hidrolíticas (SIDARI et al., 2008).

De acordo com Lima et al. (2008), o compartimento lábil da matéria orgânica, de rápida ciclagem pode favorecer a população de microrganismos do solo. Isso, somado à ocorrência de nutrientes prontamente disponíveis no solo e a maior disponibilidade hídrica no verão, favoreceu o crescimento da biomassa microbiana e maior atividade enzimática nos solos da baixada comparados aos solos do topo e encosta no verão.

Segundo Carvalho et al. (2007) ao estudarem a variação espacial da estrutura da comunidade arbórea de um fragmento de Floresta Semidecídua em Piedade do Rio Grande, MG, indicaram

que a distribuição das espécies florestais é devido às condições de cada ambiente, condicionadas por características topográficas e à adaptabilidade das espécies florestais quanto a disponibilidade de nutrientes e maior umidade do solo. Esse comportamento favorece maior atividade biológica, que também pode estar relacionada a outros fatores, por exemplo, maior luminosidade presente nas bordas do fragmento, não muito distante de curso d'água e maior aporte de serapilheira no solo.

No inverno, não foi verificada correlação significativa dos atributos biológicos com a vegetação, porém essa se apresentou correlacionada positivamente com a Declividade no NMDS1. Esses resultados indicam que a declividade condicionou a distribuição das espécies do sub-bosque no fragmento estudado (Figura 2b).

O aumento da Declividade afetou o microclima local e favorece a adaptação e crescimento das espécies Afl (*Alseis floribunda*), Uve (*Urbanodendron verrucosum*), Plo (*Pachystroma longifolium*), Nal (*Neoraputia Alba*), Big1 (espécie da família Bignoniaceae) na encosta (Figura 2b). A heterogeneidade de habitats promove a diversidade de espécies de sub-bosque (HUO; FENG; SU, 2014). Baseado nisso, outros fatores que não foram incluídos nas análises deste capítulo, por exemplo, incidência solar direta, teor de umidade do solo, efeito de borda, também podem estar relacionados nesta interação e, possivelmente discriminar a atividade biológica ao longo do gradiente topográfico no inverno.

Ainda de acordo com Botrel et al. (2002), a interpretação da relação espécie-ambiente deve ser feita com cautela, pois fatores importantes, como as condições de luz, disponibilidade hídrica e dispersão das espécies florestais, nem sempre são facilmente perceptíveis ou mensuráveis. Além disso, as espécies respondem às condições ambientais de uma forma interativa e não isoladamente, além dessa resposta estabelecer-se num ambiente de competição entre as espécies. Desta maneira, conclusões sobre a distribuição de espécies em face de fatores ambientais só devem se aproximar de uma generalização após muitas repetições do mesmo padrão em diversas áreas.

4. CONCLUSÕES

Os solos da baixada, com maior fertilidade química natural, permitiram condições para o crescimento e desenvolvimento das espécies *Actinostemon concolor*, *Guapira opposita*, *Sorocea bonplandii*, Fabaceae, *Sarcaulus brasiliensis* e *Rauia resinosa*.

No verão, as espécies *Actinostemon concolor*, *Guapira opposita*, *Rauia resinosa*, *Sorocea bonplandii* e *Sarcaulus brasiliensis* promoveram maior atividade enzimática da fosfatase ácida, desidrogenase, teores de carbono da biomassa microbiana e nitrogênio da biomassa microbiana do solo nas parcelas da baixada.

No inverno não foi verificada correlação dos atributos do solo com a vegetação no fragmento de Floresta Atlântica no sul do Espírito Santo.

5. REFERÊNCIAS

ALLISON, V. J. et al. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 39, p. 1770–1781, 2007.

ALMEIDA JUNIOR, E. B. et al. Caracterização da vegetação de restinga da RPPN de Maracaípe, PE, Brasil, com base na fisionomia, flora, nutrientes do solo e lençol freático. **Acta Botânica Brasileira**, v. 23, n.1, p.36-48. 2009.

ALMEIDA, B. G. et al. **Padronização de Métodos para Análise Granulométrica no Brasil, Comunicado técnico**, Rio de Janeiro, RJ. Comunicado Técnico, 66. Embrapa Solos. Dezembro, 2013.

ALVARES, C. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Fast Track, p.1-18, 2013.

ANDRADE, L. A. et al. Análise florística e estrutural de matas ciliares ocorrentes em brejo de altitude, no município de Areia, Paraíba. **Revista Brasileira Ciências Agrárias**. Recife, v.1, n.único, p.31-40, 2006.

BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. **Numerical ecology with R**. Nova York: Springer, 2011. 306 p.

BOTREL, R. T. et al. Influência do solo e topografia sobre as variações da composição florística e estrutura da comunidade arbóreo-arbustiva de uma Floresta Estacional Semidecidual em Ingaí, MG. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 25, n. 2, p. 195-213, 2002.

BRECHET, L. et al. Do tree species characteristics influence soil respiration in tropical forests? A test based on 16 tree species planted in monospecific plots. **Plant Soil**, v. 319, p. 235–246, 2009.

BRECHET, L. et al. Does spatial distribution of tree size account for spatial variation in soil respiration in a tropical forest? **Plant Soil**, v. 347, p. 293–303, 2011.

BURNS, R. G. et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 58, p. 216-234, 2013.

CAMARGOS, V. L et al. Influência de fatores edáficos sobre variações florísticas na Floresta Estacional Semidecídua no entorno da Lagoa Carioca, Parque Estadual do Rio Doce, MG, Brasil. **Acta Botânica Brasileira**, v. 22 n. 1, São Paulo, 2008.

CAMPOS, E. P. et al. Composição florística de um trecho de Cerradão e Cerrado *sensu stricto* e sua relação com o solo na Floresta Nacional (flona) de Paraopeba, MG, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 30, n. 3, p. 471-479, 2006.

CARDOSO, E.; SCHIAVINI, I. Relação entre distribuição de espécies arbóreas e topografia em um gradiente florestal na Estação Ecológica do Panga (Uberlândia, MG). **Revista Brasileira de Botânica**, v. 25 n. 3, 2002.

CARVALHO, P. E. R. Espécies Arbóreas Brasileiras. *Alseis floribunda*. Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica; Colombo : Embrapa Florestas, (Coleção espécies arbóreas brasileiras, 4), p. 208-213, 2010.

CARVALHO, D. A. et al. Distribuição de espécies arbóreo-arbustivas ao longo de um gradiente de solos e topografia em um trecho de floresta ripária do Rio São Francisco em Três Marias, MG, Brasil, **Revista Brasileira de Botânica**, v. 28, n. 2, p. 329-345, 2005.

CARVALHO, W. A. C. et al. Variação espacial da estrutura da comunidade arbórea de um fragmento de Floresta Semidecídua em Piedade do Rio Grande, MG, Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 30, n. 2, p. 315-335, 2007.

CHEN, Z. S. et al. Relations of soil properties to topography and vegetation in a subtropical rain forest in southern Taiwan. **Plant Ecology**, v. 132, n. 2, p. 229-241, 1997.

CUNHA, G. M. et al. Biomassa e estoque de carbono e nutrientes em Florestas Montanas da Floresta Atlântica da região norte do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1175-1185, 2009.

DEFOREST, J. L. et al. Soil microbial responses to elevated phosphorus and pH in acidic temperate deciduous forests. **Biogeochemistry**, p. 189-202, n. 109, 2012.

DICK, R. P.; BURNS, R. G. A. Brief history of soil enzymology research. In: Dick, R.P. (Ed.), **Methods of Soil Enzymology**. Madison, Soil Science Society of America, 2011. p. 1-19. Inc., Madison, Wisconsin, USA.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solos / organizadores, Guilherme Kangussú Donagema... [et al.]. — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. - (Documentos / Embrapa Solos).

ENI, D. D.; IWARA, A. I.; OFFIONG, R. A. Analysis of Soil-Vegetation Interrelationships in a South-Southern Secondary Forest of Nigeria. **International Journal of Forestry Research**, p.1-8, 2012.

FERREIRA JÚNIOR, W.G. et al. Composição florística da vegetação arbórea de um trecho de Floresta Estacional Semidecídua em Viçosa, Minas Gerais, e espécies de maior ocorrência na região. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.6, p.1121-1130, 2007.

FERREIRA, I. C. M. et al. Solos e vegetação nativa remanescente no Município de Campinas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 9, p. 1319-1327, 2007.

FINZI, A.C.; BREEMEN, N. V.; CANHAM, C. D. Canopy tree-soil interactions within temperate forests: species effects on soil carbon and nitrogen. **Ecological Applications**, v. 8, p. 440-446, 1998.

FREITAS, W. K.; MAGALHAES, L. M. S. Métodos e parâmetros para estudo da vegetação com ênfase no estrato arbóreo. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 4, p. 520-539, 2012.

GAMA, J. R. V. et al. Estrutura e potencial futuro de utilização da regeneração natural de floresta de várzea alta no município de AFUÁ, estado do PARÁ. **Ciência Florestal**, v. 13, n. 2, 2003.

GRIME, J. P. Benefits of Plant Diversity to Ecosystems: Immediate, Filter and Founder Effects, **Journal of Ecology**, v. 86, n. 6, p. 902-910, 1998.

HOLLUNDER, R. K. et al. Associação entre espécies de sub-bosque e variação topográfica em um fragmento de Floresta Atlântica. **Acta Scientiae & Technicae**, v. 2, n. 2, 2014.

HUO, H.; FENG, Q.; SU, Y. The Influences of canopy species and topographic variables on understory species diversity and composition in coniferous forests. **The Scientific World Journal**, v. 2014, Article ID 252489, 8 p., 2014.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. MAPAS DE BIOMAS E DE VEGETAÇÃO. 2004. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>>. Acesso: 02/03/16.

IEMA. Parque Estadual Mata das Flores. 2016. Disponível em <<http://www.meioambiente.es.gov.br/>>. Acesso em 10 de março 2016.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2015. Atlas SOS – Informações do Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica período 2013-2014. Disponível em:<<http://mapas.sosma.org.br/dados/>>; acesso em 14 de março 2016.

LIMA A. M. N. et al. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.1053-1063, 2008.

LODWIG, E. M. et al. Amino-acid cycling drives nitrogen fixation in the legume–Rhizobium symbiosis. **Nature**, London, v.422, p.722-726, 2003.

MACHADO, E. L. M. et al. Efeitos do substrato, bordas e proximidade espacial na estrutura da comunidade arbórea de um fragmento florestal em Lavras, MG. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 31, n. 2, p. 287-302, 2008.

MARCON, A. K. et al. Variação florístico-estrutural em resposta à heterogeneidade ambiental em uma floresta nebulosa em Ububici, Planalto Catarinense. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 103, p. 439-450, 2014.

MARIOTTE, P. et al. Subordinate plant species impact on soil microbial communities and ecosystem functioning in grasslands: Findings from a removal experiment. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 15, p. 77–85, 2013.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises**. Viçosa, UFV, 2005, 107 p.

MOREIRA, F. M. S; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2006, 729 p.

NUNES, L. A. P. L. et al. Impacto do monocultivo de café sobre os indicadores biológicos do solo na zona da Mata Mineira. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2467-2474, dez, 2009.

OKSANEN, J. et al. 2016. Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.3-5.<<http://CRAN.R-project.org/package=vegan>>.

POWLSON, D. S. et al. Soil organic matters. **European Journal of Soil Science**, v. 62, p. 1-4, 2011.

PUIG, H. A. **Floresta Tropical Úmida**. UNESP. 493 p., 2008.

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

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, p. 1141–1153, 2009.

ROVEDDER, A. P. M. et al. Relação solo-vegetação em remanescente da Floresta Estacional Decidual na Região Central do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 12, 2014.

RUGGIERO, P. G. C. et al. Relação entre solo, vegetação e topografia em área de Cerrado (Parque Estadual de Vassununga, SP): como se expressa em mapeamentos? **Acta Botânica Brasilica**, v. 20, n. 2, p. 383-394, 2006.

SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3ª Ed. Revista e Ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2013-353 p, 2013b. 353 p.

SANTOS, R. D. et al. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 6ª ed. revista e ampliada. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Embrapa Solos, 2013a. 100p.

SCHIMMELPFENNIG, J.; PERIN, J. E.; ARMILIATO, N. Levantamento de espécies arbóreas frutíferas nativas de um fragmento da mata ciliar do Rio Jacutinga no município de Arabutã. **Ágora: Revista de Divulgação Científica**, Mafra, v. 16, n. 2, 2009.

SCIPIONI, C. et al. Análise fitossociológica de um fragmento de Floresta Estacional em uma catena de solos no Morro do Cerrito, Santa Maria, RS. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, 2012, p. 457-466, 2012.

SHAW, L. J.; BURNS, R. G., 2006. Enzyme activity profiles and soil quality. In: Bloem, J.; Hopkins, D.W.; Benedetti, A. (Eds.). **Microbiological Methods for Assessing Soil Quality**. CABI, Oxfordshire, UK, p. 158-182.

SIDARI, M. et al. Influence of slope aspects on soil chemical and biochemical properties in a *Pinuslaricio* forest ecosystem of Aspromonte (Southern Italy). **European Journal of Soil Biology**, v. 44, p. 364-372, 2008.

SILVA, W. G. S. et al. Relief influence on the spatial distribution of the Atlantic Forest cover at the Ibiúna Plateau, SP. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 67, p. 403-411, 2007.

SIX, J. et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 555-569, 2006.

SOS MATA ATLANTICA. FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica no período 2013-2014. 2015, São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica.

SOUZA, J. S. et al. Análise das variações florísticas e estruturais da comunidade arbórea de um fragmento de Floresta Semidecídua às margens do rio Capivari, Lavras-MG. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n. 2, p. 185-206, 2003.

SPARLING, G. P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 30, p. 195-207, 1992.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R.W.; SCOTT, A.; BOTTOMELEY, P.J., eds. **Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties**. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p. 778-835. (Special Publication, 5).

TOWNSEND, A. R.; ASNER, G. P.; CLEVELAND, C. C. The biogeochemical heterogeneity of tropical forests. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 23, n. 8, 2008.

UNGER, M.; HOMEIER, J.; LEUSCHNER, C. Effects of soil chemistry on tropical forest biomass and productivity at different elevations in the equatorial Andes. **Oecologia**, v. 170, p. 263-274, 2012.

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York, 2002. Viçosa, UFV, 2005, 107 p.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Floresta Atlântica é um dos biomas tropicais que apresenta notável perda de biodiversidade, sobretudo pelos crescentes e contínuos desflorestamentos ao longo dos anos, estreitamente associados às atividades antrópicas. Os poucos fragmentos maiores encontram-se em locais de topografia muito acidentada. Suas formações vegetais, que incluem as florestas Ombrófila Densa Montana e Estacional Semidecídua, avaliadas neste estudo, abrigam grande número de espécies endêmicas e muitas ameaçadas de extinção, o que as tornam áreas de importância estratégica para a conservação da biodiversidade mundial. Faz saber que a aceleração dos processos de desflorestamento da Floresta Atlântica gera a necessidade de implantação de ações de pesquisas para subsidiar a elaboração de planos de manejo, conservação e recuperação ambiental destas áreas. Para isso, é imprescindível expandir o conhecimento sobre a dinâmica da interação dos fatores que determinam a qualidade do solo e a comunidade vegetal nesses ecossistemas, principalmente no que tange as classes de solos e os processos que regulam a disponibilização de nutrientes para a vegetação.

Neste trabalho foi demonstrado que na topossequência, o solo da baixada apresentou maiores teores de bases trocáveis (Ca, Mg, Na, K), P e teor de areia fina. O solo do topo apresentou maior acidez potencial (H+Al), menor teor de nutrientes disponíveis, e com maiores teores de argila. As parcelas da encosta apresentaram condição intermediária entre o topo e a baixada na feição geomorfológica de Mar de Morros no bioma Floresta Atlântica da região Sudeste. Sendo assim, ficou evidente que a declividade e a elevação do terreno condicionam a heterogeneidade química e física dos atributos do solo em topossequências de florestas no bioma Floresta Atlântica.

Por meio deste estudo foi observado que as propriedades do solo podem variar e serem influenciadas por variações topográficas, climáticas, face de exposição solar, inclinação do terreno, posição no relevo e sazonalidade. Tais condições permitiram diferentes condições de umidade e drenagem no solo de forma a afetar a distribuição das espécies vegetais no ambiente.

A declividade também apresentou relevante importância na heterogeneidade dos atributos biológicos do solo na área de estudo. Os atributos biológicos foram afetados pelas diferentes condições ambientais, uma vez que dentre os atributos biológicos avaliados, o C da biomassa microbiana (CBM), a respiração basal (RBSA), o quociente microbiano (qMIC), o quociente

metabólico (qCO_2) e a atividade da β -glucosidase mostraram-se mais sensíveis ao efeito da sazonalidade no bioma Floresta Atlântica. O CBM e o $qMIC$ foram maiores no inverno (período de menor disponibilidade hídrica), enquanto a RBSA, o qCO_2 e a atividade da β -glucosidase foram maiores no verão (período de maior disponibilidade hídrica). Os atributos biológicos foram modificados pelos atributos químicos do solo ao longo do gradiente topográfico de floresta em regeneração no bioma Floresta Atlântica e os maiores teores de COT, Ca, Mg e P nos solos correlacionaram-se positivamente com a atividade enzimática. Esse comportamento tende a promover mudanças no crescimento e distribuição das espécies vegetais no ambiente.

Os solos da baixada, com maior fertilidade química natural, permitiram melhores condições para o crescimento e desenvolvimento das espécies *Actinostemon concolor*, *Guapira opposita*, *Sorocea bonplandii*, *Guapira opposita*, Fabaceae, *Sarcaulus brasiliensis*, *Rauia resinosa*. No verão, as espécies *Actinostemon concolor*, *Guapira opposita*, *Rauia resinosa*, *Sorocea bonplandii*, *Guapira opposita*, *Sarcaulus brasiliensis* promoveram maior atividade enzimática da fosfatase ácida e desidrogenase, bem como, maiores teores de CBM e NBM do solo nas parcelas da baixada. No inverno não houve correlação dos atributos do solo com a vegetação no fragmento de floresta Atlântica no sul do Espírito Santo.

Na abordagem deste estudo, ficou elucidado que a heterogeneidade ambiental determina a adaptabilidade e desenvolvimento das espécies florestais no gradiente topográfico de fragmento de Floresta Atlântica. Esta interação envolveu dentre outros fatores, a disponibilidade de nutrientes, umidade do solo, luminosidade, condições de temperatura produzindo feedbacks entre plantas e solo, garantindo a sobrevivência das espécies florestais nos ambientes de melhor adaptação.

Assim, planos de manejo para a manutenção e aproveitamento da biodiversidade de ecossistemas naturais devem considerar a interação entre os diferentes tipos de solo e a vegetação. Essa interação é variável na paisagem, que por sua vez, resulta em condições de maior ou menor disponibilidade de nutrientes e, conseqüentemente, condiciona efeitos diversos sobre a estrutura e função do ecossistema.

APÊNDICES

APÊNDICE B - Teores médios dos atributos químicos das amostras de solo coletadas na profundidade de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m em um gradiente topográfico em Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil.

Parcelas	pH	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB ¹	t ²	T ³	V ⁴	m ⁵	COT ⁶
	H ₂ O	--- mg dm ⁻³ ---			----- cmol _c dm ⁻³ -----					-----%-----		g kg ⁻¹		
Profundidade de 0,0 - 0,10 m														
P15	6,15	5,89	195,67	0,03	8,12	2,52	0,00	2,92	11,16	11,16	14,08	79,30	0,00	30,03
P15A	6,16	15,50	195,00	0,04	10,01	2,42	0,00	2,72	12,97	12,97	15,69	82,65	0,00	40,74
P14A	6,30	5,00	155,33	0,03	9,43	2,20	0,00	1,87	12,06	12,06	13,93	86,58	0,00	21,13
P14B	5,25	2,07	138,67	0,03	3,94	1,79	0,20	6,52	6,12	6,32	12,64	48,42	3,17	21,61
P13	6,20	1,74	129,67	0,02	2,82	1,96	0,00	2,09	5,13	5,13	7,22	71,06	0,00	12,33
P13C	5,96	2,30	55,00	0,03	2,33	0,86	0,00	3,77	3,37	3,37	7,13	47,19	0,00	16,54
P12B	5,36	1,86	58,67	0,02	1,63	0,76	0,07	3,82	2,57	2,63	6,39	40,16	2,54	11,81
P12C	5,62	3,50	67,33	0,02	2,31	0,88	0,03	4,43	3,38	3,42	7,81	43,32	0,97	11,27
P11A	6,09	1,89	101,33	0,02	3,19	1,42	0,00	2,34	4,89	4,89	7,22	67,64	0,00	17,31
P11B	5,46	1,49	104,67	0,02	1,66	1,24	0,18	3,93	3,19	3,37	7,12	44,77	5,43	12,27
P11D	5,81	2,56	159,67	0,02	2,96	1,26	0,00	3,14	4,65	4,65	7,78	59,74	0,00	15,49
P10	5,99	4,69	175,33	0,02	4,65	1,64	0,00	3,38	6,76	6,76	10,14	66,65	0,00	15,96
P10C	5,58	4,94	152,67	0,02	2,64	0,92	0,00	2,94	3,97	3,97	6,91	57,47	0,00	14,45
P9B	5,81	1,52	107,00	0,02	3,19	1,14	0,02	2,23	4,62	4,64	6,85	67,46	0,37	11,48
P9C	5,44	1,55	81,33	0,02	2,18	1,19	0,13	3,82	3,60	3,74	7,43	48,52	3,56	12,80
P8A	6,07	1,71	206,67	0,04	7,21	2,71	0,00	2,83	10,49	10,49	13,32	78,73	0,00	29,59
P8C	4,99	2,35	59,00	0,15	3,23	2,05	0,70	9,10	5,57	6,27	14,68	37,98	11,16	27,93
P7	5,63	1,41	88,00	0,01	1,87	1,54	0,05	3,82	3,65	3,70	7,47	48,82	1,35	19,63
P7A	5,23	1,54	77,67	0,02	2,37	1,12	0,12	4,35	3,71	3,82	8,05	46,03	3,06	15,76
P6A	4,70	1,17	65,67	0,01	0,84	0,67	0,75	7,56	1,68	2,43	9,25	18,20	30,84	17,55
P6B	4,94	1,13	67,00	0,00	2,12	1,83	0,38	6,27	4,11	4,50	10,38	39,62	8,43	18,06
P6D	4,66	1,16	51,67	0,01	1,43	1,06	0,60	8,80	2,63	3,23	11,43	22,98	18,60	23,87
P5A	4,37	2,03	52,33	0,00	1,32	0,55	1,20	8,09	2,00	3,20	10,09	19,85	37,47	25,91
P5B	4,39	1,79	50,67	0,00	0,98	0,58	1,13	6,88	1,68	2,82	8,56	19,68	40,21	19,24
P4	4,67	2,45	67,00	0,01	1,55	0,63	0,78	6,77	2,37	3,16	9,14	25,97	24,82	18,90

Continuação...

Parcelas	pH	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB ¹	t ²	T ³	V ⁴	m ⁵	COT ⁶
	H ₂ O	--- mg dm ⁻³ ---					cmol _c dm ⁻³					-----%-----		g kg ⁻¹
Profundidade de 0,10-0,20 m														
P15	5,89	3,31	106,00	0,03	4,31	1,82	0,00	2,94	6,43	6,43	9,37	68,61	0,00	16,30
P15A	5,94	6,79	145,00	0,03	5,04	1,82	0,03	1,87	7,26	7,29	9,13	79,51	0,45	18,02
P14A	5,98	4,74	85,00	0,02	4,21	1,44	0,10	3,52	5,88	5,98	9,40	62,56	1,67	12,64
P14B	5,03	1,82	94,67	0,02	2,01	1,27	0,85	5,97	3,54	4,39	9,51	37,25	19,35	12,45
P13	6,36	1,21	100,33	0,01	1,88	1,50	0,00	1,68	3,65	3,65	5,33	68,50	0,00	10,56
P13C	5,66	1,93	30,67	0,03	1,41	0,69	0,08	3,66	2,21	2,29	5,86	37,63	3,62	11,06
P12B	5,17	1,08	38,67	0,01	1,21	0,69	0,18	2,67	2,01	2,19	4,68	42,95	8,35	13,31
P12C	5,26	2,85	36,00	0,02	0,91	0,65	0,10	4,21	1,66	1,76	5,87	28,33	5,67	6,04
P11A	6,28	1,57	71,00	0,02	1,93	1,17	0,00	1,05	3,30	3,30	4,35	75,95	0,00	6,67
P11B	5,03	1,21	71,00	0,01	0,70	0,85	0,32	3,55	1,74	2,06	5,29	32,95	15,38	20,24
P11D	5,35	1,19	139,00	0,02	1,85	1,01	0,33	3,82	3,23	3,56	7,05	45,77	9,36	14,81
P10	5,64	1,68	141,00	0,02	2,52	1,19	0,00	3,93	4,09	4,09	8,02	50,98	0,00	15,63
P10C	5,49	2,71	132,33	0,01	2,35	0,83	0,12	3,49	3,53	3,65	7,03	50,28	3,20	14,94
P9B	5,50	1,19	88,33	0,03	1,64	0,83	0,18	3,38	2,72	2,91	6,11	44,60	6,30	11,82
P9C	4,90	1,05	66,67	0,02	0,90	0,87	0,57	3,60	1,96	2,53	5,56	35,22	22,45	14,99
P8A	6,20	1,82	198,00	0,05	4,14	2,30	0,00	3,41	7,00	7,00	10,41	67,26	0,00	21,63
P8C	5,07	7,75	25,67	0,19	1,27	1,54	1,08	10,48	3,07	4,15	13,54	22,63	26,11	16,46
P7	5,49	1,01	75,00	0,01	0,96	1,28	0,20	3,00	2,44	2,64	5,44	44,91	7,56	12,96
P7A	5,10	1,13	58,67	0,02	1,12	0,90	0,32	4,07	2,19	2,50	6,26	34,96	12,66	12,50
P6A	4,50	0,96	32,00	0,01	0,01	0,29	1,33	8,31	0,39	1,73	8,70	4,51	77,27	16,42
P6B	4,80	0,94	33,33	0,01	0,51	0,72	0,80	7,67	1,33	2,13	9,01	14,81	37,49	15,63
P6D	4,51	0,95	36,33	0,00	0,60	0,68	0,98	5,67	1,37	2,35	7,03	19,42	41,86	20,44
P5A	4,36	1,32	35,33	0,01	0,49	0,24	1,80	8,06	0,82	2,62	8,88	9,26	68,64	20,34
P5B	4,37	1,43	31,00	0,00	0,26	0,35	1,52	6,55	0,69	2,21	7,24	9,55	68,71	15,72
P4	4,45	0,96	46,33	0,02	0,21	0,39	1,45	6,16	0,74	2,19	6,90	10,75	66,16	18,24

¹Soma de bases = Ca²⁺+Mg²⁺+Na⁺+K⁺; ²CTC efetiva; ³CTC a pH 7; ⁴Saturação por bases = 100 x SB/T; ⁵Saturação por alumínio = 100 x Al³⁺ / (SB+Al³⁺); ⁶COT = carbono orgânico total.

Conclusão.

APÊNDICE C - Teores médios dos atributos físicos e classificação textural das amostras de solo coletadas na profundidade de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m em um gradiente topográfico em Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil.

Parcelas	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Classe Textural	Relação Silte/argila	ADA ¹	GF ²	Ds ³	Dp ⁴	PT ⁵	Micro ⁶	Macro ⁷
	----- g kg ⁻¹ -----						g kg ⁻¹	%	--- g cm ⁻³ ---		----- m ³ m ³ -----		
Profundidade 0,0-0,10 m													
P15	252,41	233,22	129,38	384,98	Argilosa	0,34	187	51,43	0,90	2,50	0,64	0,35	0,29
P15A	468,92	117,65	115,20	298,23	Média	0,39	138	53,73	0,96	2,44	0,61	0,47	0,14
P14A	303,40	98,51	83,16	514,93	Argilosa	0,16	168	67,37	0,89	2,63	0,66	0,38	0,28
P14B	394,95	166,38	91,04	347,63	Média	0,26	136	60,88	1,25	2,50	0,50	0,33	0,16
P13	539,05	102,49	88,19	270,26	Média	0,33	197	27,11	1,34	2,70	0,50	0,25	0,26
P13C	511,95	140,49	76,07	271,49	Média	0,28	109	59,85	1,04	2,78	0,62	0,17	0,46
P12B	609,37	97,75	45,80	247,09	Média	0,19	152	38,48	1,24	2,78	0,55	0,17	0,38
P12C	510,48	72,47	131,19	285,86	Média	0,46	197	31,09	1,22	2,65	0,54	0,20	0,34
P11A	632,57	84,06	63,33	220,04	Média	0,29	80	63,64	1,17	2,85	0,59	0,17	0,42
P11B	616,17	81,62	77,98	224,23	Média	0,35	110	50,94	1,17	2,72	0,57	0,16	0,41
P11D	608,60	111,39	76,67	203,33	Média	0,38	74	63,61	1,27	2,68	0,53	0,20	0,33
P10	575,46	127,86	96,67	200,00	Média	0,48	61,33	69,33	1,01	2,61	0,61	0,19	0,42
P10C	681,33	105,33	60,00	153,33	Média	0,39	59,33	61,30	1,26	2,57	0,51	0,25	0,25
P9B	418,53	155,38	68,61	357,48	Argilosa	0,19	149	58,32	1,22	2,72	0,55	0,22	0,33
P9C	540,10	104,97	87,74	267,19	Média	0,33	173	35,25	1,26	2,63	0,52	0,21	0,31
P8A	284,89	234,95	107,33	372,83	Argilosa	0,29	149	60,04	1,06	2,61	0,59	0,42	0,18
P8C	529,67	143,97	58,46	267,90	Média	0,22	213	20,49	0,95	2,64	0,64	0,45	0,19
P7	612,58	97,35	56,02	234,05	Média	0,24	141	39,76	1,13	2,74	0,59	0,22	0,36
P7A	522,34	109,75	56,79	311,12	Média	0,18	192	38,29	1,29	2,75	0,53	0,22	0,31
P6A	357,79	79,46	68,13	494,62	Argilosa	0,14	280	43,39	1,16	2,72	0,57	0,29	0,28
P6B	367,32	74,47	95,45	462,75	Argilosa	0,21	283	38,84	1,22	2,65	0,54	0,30	0,23
P6D	477,99	125,70	72,72	323,59	Média	0,22	260	19,65	1,06	2,70	0,61	0,30	0,31
P5A	318,95	84,74	31,00	565,31	Argilosa	0,05	314	44,46	1,05	2,61	0,60	0,30	0,29
P5B	374,24	59,95	76,79	489,03	Argilosa	0,16	311	36,40	1,03	2,61	0,60	0,27	0,33
P4	327,28	62,71	163,33	446,67	Argilosa	0,37	242,66	45,67	1,13	2,74	0,59	0,32	0,27

Continuação...

Parcelas	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Classe Textural	Relação Silte/argila	ADA ¹	GF ²	Ds ³	Dp ⁴	PT ⁵	Micro ⁶	Macro ⁷
	----- g kg ⁻¹ -----						g kg ⁻¹	%	--- g cm ⁻³ ---		----- m ³ m ³ -----		
Profundidade 0,10-0,20 m													
P15	254,09	253,16	106,89	385,87	Argilosa	0,28	219	43,25	1,27	2,74	0,54	0,41	0,13
P15A	185,97	158,70	166,04	489,30	Argilosa	0,34	230	52,99	1,12	2,24	0,50	0,47	0,03
P14A	355,49	133,99	108,87	401,64	Argilosa	0,27	169	57,92	1,22	2,56	0,52	0,35	0,18
P14B	252,82	206,76	88,13	452,28	Argilosa	0,19	164	63,74	1,28	2,69	0,52	0,29	0,23
P13	500,02	107,21	91,18	301,60	Média	0,30	199	34,02	1,43	2,78	0,49	0,24	0,25
P13C	482,07	73,69	69,61	374,63	Argilosa	0,19	117	68,77	1,21	2,62	0,54	0,18	0,36
P12B	547,32	87,63	26,63	338,42	Média	0,08	228	32,63	1,34	2,74	0,51	0,22	0,29
P12C	317,71	173,42	100,51	408,36	Argilosa	0,25	174	57,39	1,36	2,25	0,39	0,19	0,20
P11A	590,61	130,49	57,84	221,05	Média	0,26	132	40,29	1,28	2,72	0,53	0,17	0,36
P11B	503,67	115,87	76,21	304,25	Média	0,25	153	49,71	1,23	2,72	0,55	0,18	0,37
P11D	514,55	152,11	96,67	236,67	Média	0,41	105,33	55,49	1,37	2,62	0,48	0,22	0,26
P10	531,03	138,97	83,33	246,67	Média	0,34	80	67,57	1,14	2,65	0,57	0,25	0,32
P10C	585,83	144,16	53,33	216,67	Média	0,25	70	67,69	1,34	2,58	0,48	0,22	0,26
P9B	470,91	131,37	48,45	349,27	Média	0,14	127	63,64	1,36	2,68	0,49	0,23	0,26
P9C	503,23	101,43	84,32	311,02	Média	0,27	211	32,16	1,34	2,72	0,51	0,34	0,17
P8A	271,74	238,10	110,75	379,41	Argilosa	0,29	191	49,66	1,24	2,68	0,54	0,39	0,14
P8C	109,28	194,29	184,60	511,83	Argilosa	0,36	227	55,65	1,14	2,72	0,58	0,47	0,11
P7	556,91	110,11	54,74	278,24	Média	0,20	146	47,53	1,27	2,84	0,55	0,24	0,31
P7A	484,67	95,85	53,39	366,09	Argilosa	0,15	231	36,90	1,36	2,73	0,50	0,26	0,24
P6A	290,99	145,86	150,16	412,99	Argilosa	0,36	275	33,41	1,15	2,65	0,56	0,31	0,26
P6B	331,22	73,60	73,61	521,57	Argilosa	0,14	301	42,29	1,28	2,61	0,51	0,35	0,16
P6D	303,87	76,19	117,59	502,35	Argilosa	0,23	305	39,29	1,13	2,84	0,60	0,33	0,28
P5A	350,32	198,45	53,76	397,47	Argilosa	0,14	301	24,27	1,04	2,72	0,62	0,46	0,16
P5B	303,54	64,06	59,00	573,39	Argilosa	0,10	327	42,97	1,13	2,75	0,59	0,34	0,25
P4	300,01	59,99	80,00	560,00	Argilosa	0,14	276,66	50,60	1,19	2,36	0,50	0,33	0,16

¹ADA = argila dispersa em água; ²GF = grau de flocação [(Argila-ADA) / argila]; ³Ds = densidade do solo; ⁴Dp = densidade de partículas; ⁵PT = porosidade total; ⁶Micro = microporosidade; ⁷Macro = macroporosidade.

Conclusão

APÊNDICE D - Atributos físicos e químicos dos solos na profundidade de 0,60-0,80 m em um gradiente topográfico em Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil.

Parcelas	Areia Total	Silte	Argila	S/A ¹	Ta/Tb ²	pH	SB ³	T ⁴	V ⁴	m ⁶	PST ⁷	B/A
	-----g kg ⁻¹ -----					H ₂ O	-- cmol _c dm ⁻³ --			-----%		
P15	680,00	90,00	230,00	0,39	19,35	5,54	2,55	4,45	57,37	3,77	0,67	0,60
P15A	490,00	150,00	360,00	0,42	22,58	5,88	5,82	8,13	71,60	0,00	0,37	0,91
P14A	450,00	170,00	380,00	0,45	19,55	5,42	4,38	7,43	58,92	11,16	0,81	0,83
P14B	630,00	120,00	250,00	0,48	22,40	5,33	2,05	5,60	36,65	10,86	0,71	0,63
P13	360,00	90,00	550,00	0,16	9,71	4,94	1,95	5,34	36,60	21,97	0,37	1,92
P13C	420,00	50,00	530,00	0,09	8,62	5,15	1,77	4,57	38,66	10,16	0,22	1,64
P12B	490,00	60,00	450,00	0,13	12,56	5,26	2,68	5,65	47,44	3,60	0,18	1,54
P12C	440,00	40,00	520,00	0,08	7,94	5,52	2,48	4,13	60,02	1,98	0,24	1,50
P11A	590,00	60,00	350,00	0,17	9,17	4,90	0,81	3,21	25,38	40,32	0,31	1,59
P11B	430,00	110,00	460,00	0,24	11,00	4,85	1,60	5,06	31,53	20,05	0,20	1,74
P11D	300,00	90,00	610,00	0,15	9,07	4,83	1,08	5,53	19,45	62,60	0,18	2,77
P10	410,00	120,00	470,00	0,26	16,23	4,73	2,02	7,63	26,48	44,96	0,13	2,10
P10C	620,00	80,00	300,00	0,27	17,70	4,76	1,02	5,31	19,13	54,17	0,38	1,62
P9B	480,00	10,00	510,00	0,02	9,73	4,82	0,83	4,96	16,83	62,65	0,20	1,44
P9C	490,00	70,00	440,00	0,16	14,11	5,67	3,32	6,21	53,50	0,00	0,32	1,52
P8A	680,00	110,00	210,00	0,52	26,57	5,23	1,53	5,58	27,51	32,84	3,41	0,56
P8C	530,00	0,00	470,00	0,00	21,66	5,64	6,97	10,18	68,41	0,00	27,50	1,21
P7	595,00	50,00	355,00	0,14	11,89	5,21	2,07	4,22	49,16	4,60	0,24	1,39
P7A	420,00	85,00	495,00	0,17	8,67	5,09	1,41	4,29	32,75	18,78	0,35	1,46
P6A	260,00	120,00	620,00	0,19	7,05	4,96	0,74	4,37	16,95	42,61	0,46	1,37
P6B	260,00	80,00	660,00	0,12	8,38	5,21	1,24	5,53	22,40	37,72	0,18	1,34
P6D	360,00	70,00	570,00	0,11	8,47	4,97	1,20	4,83	24,78	27,35	0,41	1,38
P5A	340,00	0,00	660,00	0,00	9,03	4,67	0,68	5,96	11,48	69,35	0,34	1,37
P5B	280,00	60,00	660,00	0,09	7,79	4,71	0,52	5,14	10,13	72,16	0,58	1,24
P4	400,00	110,00	490,00	0,22	12,47	4,47	0,58	6,11	9,49	73,40	0,49	0,94

¹Relação Silte/Argila; ²Atividade da fração argila = CTC X 1000/ argila; ³Soma de bases = Ca²⁺+Mg²⁺+Na⁺+K⁺; ⁴CTC a pH 7; ⁵Saturação por bases = 100 x SB/T; ⁶Saturação por alumínio = 100 x Al³⁺ / (SB+Al³⁺); ⁷PST= Porcentagem de sódio trocável; ⁸Caratér argilúvico = Argila 0,60-0,80 m/Argila 0,0-0,20 m.

APÊNDICE E - Variáveis topográficas das parcelas de coleta de solo na área de estudo.

Parcelas	Aspecto ¹	Curvatura ²	Declividade (%)	Elevação (m)	Face de exposição ³	cosseno de Aspecto*	seno de Aspecto**	IPT	Incidência solar direta Wh m ⁻²
P15	191,31	-0,76	0	117	Sul	-0,98	-0,20	2	1243044
P15A	288,43	0,00	0	117	Oeste	0,32	-0,95	2	1243044
P14A	225,00	-0,33	0	119	Sudoeste	-0,71	-0,71	2	1249496
P14B	235,12	0,33	0	122	Sudoeste	-0,57	-0,82	3	1207846
P13	244,03	-0,11	27	126	Sudoeste	-0,44	-0,90	3	1192378
P13C	261,87	0,00	16	123	Oeste	-0,14	-0,99	3	1211236
P12B	238,82	-0,76	21	134	Sudoeste	-0,52	-0,86	3	1171922
P12C	218,42	-0,76	31	128	Sudoeste	-0,78	-0,62	3	1171922
P11A	243,12	-1,41	21	128	Sudoeste	-0,45	-0,89	1	1197542
P11B	248,59	0,87	22	143	Oeste	-0,37	-0,93	3	1098693
P11D	228,37	1,20	27	149	Sudoeste	-0,66	-0,75	3	1083516
P10	199,61	-0,76	27	142	Sul	-0,94	-0,34	3	1053527
P10C	192,05	0,22	29	136	Sul	-0,98	-0,21	3	1051813
P9B	182,94	-0,54	32	125	Sul	-1,00	-0,05	3	1084181
P9C	182,94	-0,54	36	125	Sul	-1,00	-0,05	3	1080628
P8A	212,01	-0,98	0	118	Sul	-0,85	-0,53	1	1230766
P8C	296,57	-0,76	0	118	Noroeste	0,45	-0,89	1	1230766
P7	318,27	1,52	29	137	Noroeste	0,75	-0,67	3	1277867
P7A	287,05	0,98	28	137	Oeste	0,29	-0,96	3	1277073
P6A	296,57	0,33	25	149	Noroeste	0,45	-0,89	3	1267062
P6B	296,27	1,52	23	171	Noroeste	0,44	-0,90	4	1234189
P6D	266,42	3,26	15	171	Oeste	-0,06	-1,00	4	1250918
P5A	172,15	0,54	7	173	Sul	-0,99	0,14	4	1177046
P5B	145,12	0,54	16	161	Sudeste	-0,82	0,57	4	1103901
P4	141,52	0,22	24	154	Sudeste	-0,78	0,62	4	1058222

¹Aspecto = Variável circular [valor mínimo (0°) e máximo (360°)]. ²Curvatura do terreno= Convexidade (valores próximos a +1) e concavidade (valores próximos a -1) do terreno; ³Transformação categórica de Aspecto = orientação da parcela voltada para sul, norte ou noroeste, etc . ⁴Transformação linear de Aspecto = valores em graus transformados para radianos ([valor de interesse * pi]/180), gerando duas novas variáveis: (*) cosseno (novo valor), representa a exposição de Norte (+1) a Sul (-1); (**) seno (novo valor), representa a exposição de Leste (+1) a Oeste (-1); ⁵IPT = Índice qualitativo que representa a posição da parcela no relevo. ⁶Radiação Solar = valores médios do ano de 2015, calculados em intervalos de 14 dias. Todos os valores para parcelas de 10x10 m. Declividade < 3% = 0.

APÊNDICE F - Teores médios dos atributos biológicos das amostras de solo coletadas na profundidade de 0,0-0,10 m em um gradiente topográfico em Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil, período verão.

Parcelas	CBM	qMIC	NBM	NMA	RBSA	qCO ₂	FA	BG	DES
	µg g ⁻¹	%	µg g ⁻¹	mg kg ⁻¹	*	**	----- µg p-nitrofenol h ⁻¹ g ⁻¹ solo -----		µg TPF g ⁻¹ solo seco
P15	512,73	1,71	74,32	42,47	680,25	0,063	1022,52	238,18	12,02
P15A	956,36	2,35	50,12	46,90	665,01	0,033	1174,09	231,36	18,99
P14A	283,64	1,34	46,67	36,87	583,05	0,098	895,17	222,27	18,48
P14B	469,09	2,17	39,75	36,17	704,01	0,071	1069,42	190,09	11,94
P13	163,64	1,33	41,48	24,03	695,13	0,202	402,55	122,73	8,70
P13C	316,36	1,91	46,67	42,70	509,37	0,077	419,11	128,75	11,55
P12B	236,36	2,00	53,58	19,37	555,57	0,112	327,76	107,64	3,64
P12C	250,91	2,23	32,84	17,97	574,05	0,109	515,92	114,85	6,81
P11A	250,91	1,45	17,28	42,70	666,51	0,126	333,69	167,12	8,61
P11B	247,27	2,01	57,04	18,67	555,33	0,107	424,81	128,73	6,93
P11D	229,09	1,48	31,11	15,17	527,97	0,110	339,85	98,75	8,20
P10	123,64	0,77	17,28	20,77	608,82	0,234	618,73	147,27	9,60
P10C	109,09	0,75	22,47	15,17	562,89	0,246	430,50	61,06	5,02
P9B	250,91	2,19	27,65	18,43	545,97	0,104	306,36	91,39	4,15
P9C	261,82	2,05	25,93	23,10	505,29	0,092	381,53	106,21	10,13
P8A	450,91	1,52	74,32	41,30	716,47	0,076	894,03	250,14	13,99
P8C	581,82	2,08	69,14	52,50	636,80	0,052	1405,18	241,64	10,62
P7	116,36	0,59	60,49	28,93	616,29	0,252	440,75	136,67	7,05
P7A	196,36	1,25	24,20	23,80	526,65	0,128	587,67	140,18	8,28
P6A	643,64	3,67	38,02	27,53	538,87	0,040	638,58	267,39	11,82
P6B	352,73	1,95	29,38	17,97	640,30	0,086	711,81	180,00	11,69
P6D	516,36	2,16	41,48	29,17	547,89	0,051	697,85	270,47	13,50
P5A	610,91	2,36	46,67	18,20	661,41	0,052	697,00	240,27	10,33
P5B	240,00	1,25	24,20	21,00	676,41	0,134	646,89	223,15	8,29
P4	265,45	1,40	25,93	21,93	638,13	0,114	543,25	221,36	10,25

CBM = carbono da biomassa microbiana; qMIC = quociente microbiano ; NBM = nitrogênio da biomassa microbiana; NMA = nitrogênio mineralizável anaerobicamente; *RBSA = Respiração basal do solo acumulada (mg C-CO₂ kg⁻¹ de solo); ** qCO₂ = quociente metabólico (µg C-CO₂. µg⁻¹ CBM dia⁻¹) , FA = fosfatase ácida; BG = β-glucosidase; DES = desidrogenase.

APÊNDICE G - Teores médios dos atributos biológicos das amostras de solo coletadas na profundidade de 0,0-0,10 m em um gradiente topográfico em Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil, período inverno.

Parcelas	CBM µg g ⁻¹	qMIC %	NBM µg g ⁻¹	NMA mg kg ⁻¹	RBSA *	qCO ₂ **	FA -----µg p-nitrofenol h ⁻¹ g ⁻¹ solo -----	BG	DES µg TPF g ⁻¹ solo seco
P15	854,55	1,98	54,44	36,52	545,25	0,030	775,58	89,07	16,48
P15A	523,64	1,86	77,78	49,23	546,33	0,050	802,92	124,93	21,68
P14A	458,18	2,21	42,35	43,40	444,57	0,046	1004,50	138,23	15,78
P14B	407,27	3,07	38,02	27,65	392,49	0,046	820,00	144,58	8,21
P13	374,55	3,27	51,85	44,92	289,17	0,037	380,69	63,73	11,48
P13C	203,64	2,11	50,12	35,12	390,21	0,091	422,53	84,44	8,27
P12B	221,82	3,41	28,52	22,98	459,81	0,099	428,22	64,53	9,52
P12C	352,73	5,13	31,11	22,52	419,73	0,057	365,58	92,81	9,29
P11A	247,27	2,52	23,33	38,03	374,61	0,072	380,15	60,86	8,10
P11B	240,00	2,02	23,33	22,87	353,13	0,070	341,67	65,86	7,78
P11D	276,36	0,82	16,42	18,43	417,09	0,072	560,33	68,36	8,71
P10	378,18	2,71	32,84	22,17	437,13	0,055	510,22	63,89	10,73
P10C	367,27	1,14	51,85	21,00	410,97	0,053	361,03	51,42	8,25
P9B	265,45	1,47	25,93	28,47	456,93	0,082	330,62	68,02	6,43
P9C	287,27	0,88	44,94	35,58	447,45	0,074	395,77	35,57	7,57
P8A	625,45	1,49	79,51	54,13	543,45	0,041	734,58	127,97	16,08
P8C	694,55	2,70	56,17	41,42	559,77	0,038	982,86	122,13	10,38
P7	334,55	2,82	16,42	22,98	412,05	0,059	638,92	59,52	8,66
P7A	465,45	1,45	28,52	25,78	425,25	0,044	602,00	55,77	8,38
P6A	734,55	1,99	57,04	19,83	498,69	0,032	739,14	126,80	11,32
P6B	618,18	1,65	32,84	23,57	502,89	0,039	894,03	147,86	13,25
P6D	752,73	2,85	73,46	22,17	446,13	0,028	720,92	100,21	11,18
P5A	403,64	2,88	58,77	24,85	538,41	0,064	617,28	112,44	11,46
P5B	325,45	1,98	55,31	22,28	523,41	0,077	624,62	108,03	14,36
P4	250,91	0,86	30,25	29,63	441,93	0,084	687,89	95,24	13,23

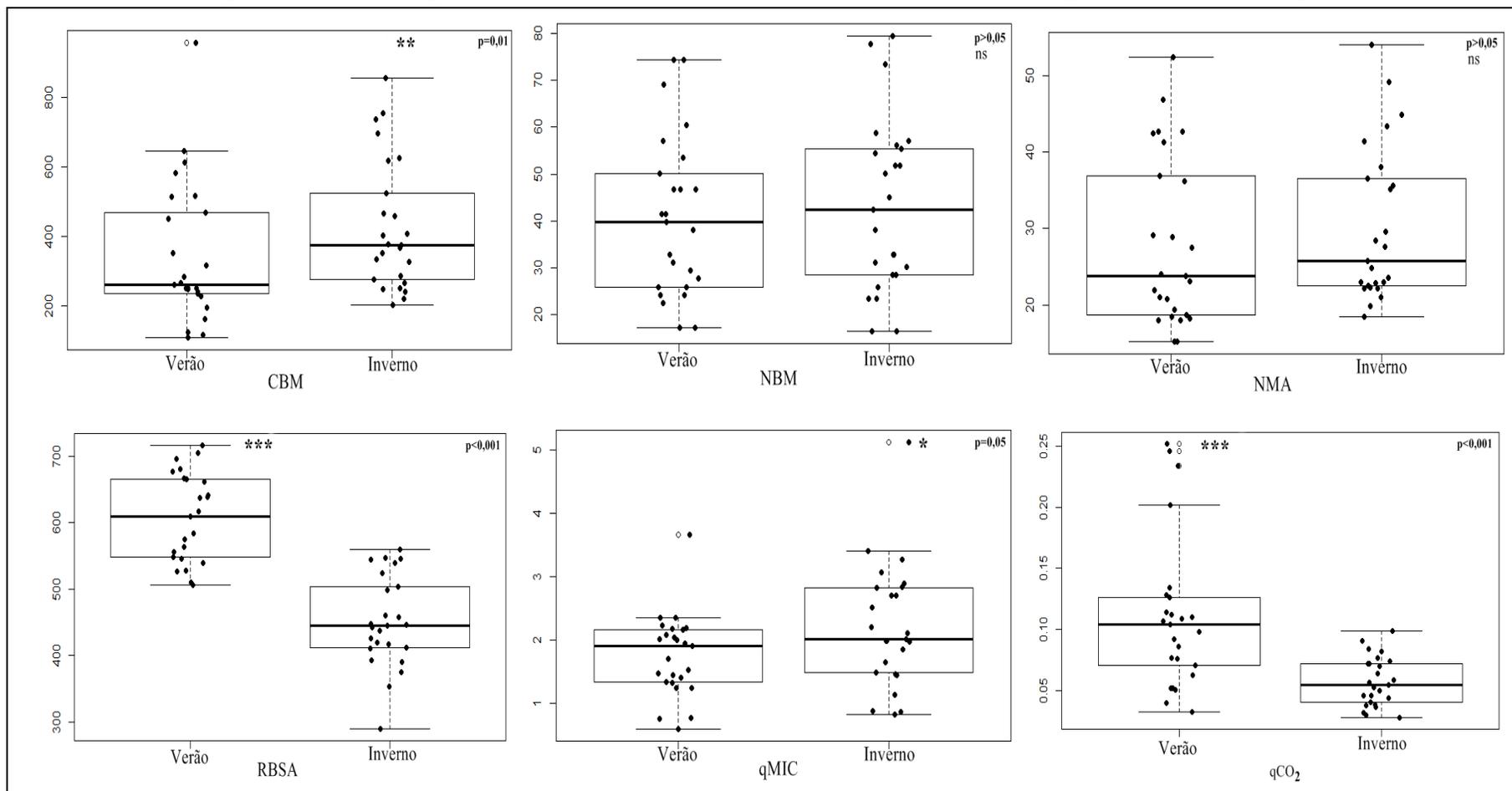
CBM = carbono da biomassa microbiana; qMIC = quociente microbiano; NBM = nitrogênio da biomassa microbiana; NMA = nitrogênio mineralizável anaerobicamente; *RBSA = Respiração basal do solo acumulada (mg C-CO₂ kg⁻¹ de solo); **qCO₂ = quociente metabólico (µg C-CO₂. µg⁻¹ CBM dia⁻¹); FA = fosfatase ácida; BG = β-glucosidase; DES = desidrogenase.

APÊNDICE H - Teores médios dos atributos físicos (umidade do solo) e químicos (COT, NT e relação C/N) do solo coletado em 0,0-0,10 m em gradiente topográfico, em Floresta Atlântica, Espírito Santo, Brasil, no verão e inverno, respectivamente.

Parcelas	Verão				Inverno			
	Umidade g g ⁻¹	COT g kg ⁻¹	NT	COT/NT %	Umidade g g ⁻¹	COT g kg ⁻¹	NT	COT/NT %
P15	20,71	30,03	3,68	8,15	20,55	43,16	3,05	14,16
P15A	33,61	40,74	4,55	8,96	27,70	28,17	3,97	7,09
P14A	27,12	21,13	2,44	8,66	19,04	20,76	3,18	6,52
P14B	18,48	21,61	2,55	8,47	14,97	13,27	2,26	5,86
P13	9,63	12,33	1,66	7,41	8,12	11,44	1,82	6,28
P13C	8,76	16,54	1,94	8,50	9,08	9,65	1,56	6,19
P12B	8,60	11,82	1,29	9,15	7,12	6,50	1,22	5,33
P12C	8,40	11,27	1,48	7,64	8,63	6,87	1,25	5,51
P11A	7,25	17,31	1,85	9,37	5,99	9,81	1,56	6,28
P11B	5,30	12,27	1,14	10,81	6,09	11,89	1,14	10,43
P11D	6,75	15,49	1,35	11,47	5,35	33,64	1,60	21,05
P10	6,48	15,96	1,91	8,36	6,37	13,97	1,87	7,49
P10C	5,03	14,45	1,35	10,71	5,67	32,29	1,39	23,20
P9B	6,34	11,48	1,38	8,30	7,56	18,11	1,42	12,77
P9C	8,88	12,80	2,01	6,38	8,49	32,65	1,52	21,52
P8A	23,43	29,59	3,51	8,43	22,13	41,99	4,66	9,01
P8C	7,00	27,93	3,47	8,05	26,74	25,70	2,70	9,53
P7	8,08	19,63	2,38	8,27	7,32	11,85	1,55	7,66
P7A	8,48	15,76	1,54	10,24	5,03	32,12	1,64	19,63
P6A	13,04	17,55	1,97	8,91	12,85	36,91	1,71	21,59
P6B	14,07	18,06	2,00	9,02	12,00	37,50	1,86	20,12
P6D	14,69	23,87	2,50	9,54	15,25	26,45	1,87	14,18
P5A	15,98	25,91	2,13	12,17	15,14	13,95	1,85	7,54
P5B	13,87	19,24	2,28	8,44	13,51	16,10	1,85	8,68
P4	15,45	18,90	2,09	9,03	15,17	29,18	1,95	14,99

COT = carbono orgânico total; NT = nitrogênio total, COT/NT = relação carbono orgânico total/nitrogênio total.

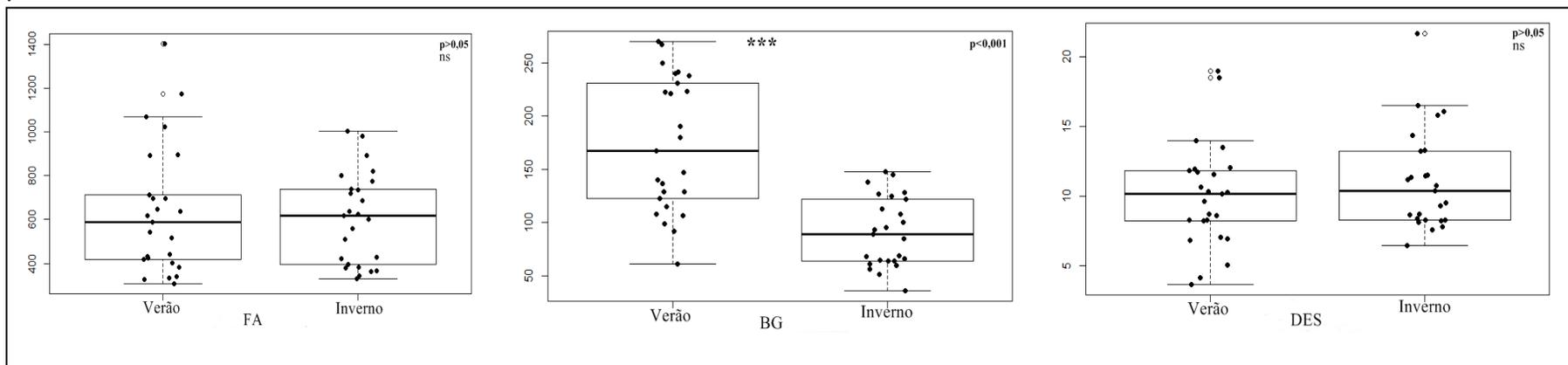
APÊNDICE I – Boxplots do efeito dos períodos de coleta, verão e inverno, sobre os atributos biológicos do solo. Teste t pareado de Wilcoxon.



CBM = carbono da biomassa microbiana; NBM = nitrogênio da biomassa microbiana; NMA = nitrogênio mineralizável anaerobicamente; RBSA = respiração basal do solo acumulada; qMIC= quociente microbiano; qCO₂ = quociente metabólico.

*significativo; ns = não significativo; p = p valor

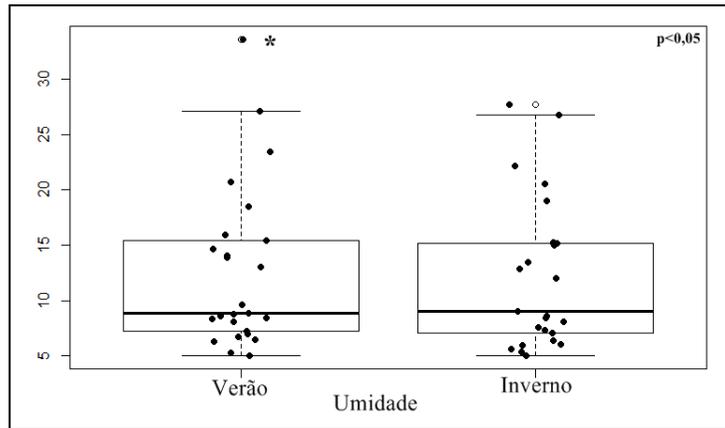
Continuação...



FA = fosfatase ácida; BG = β-glucosidase; DES = desidrogenase.
 * significativo, ns = não significativo, p= p valor.

Conclusão.

APÊNDICE J – Boxplot do efeito dos períodos de coleta, verão e inverno, sobre a umidade do solo. Teste t pareado de Wilcoxon.



* significativo, p= p valor.

APÊNDICE K - Modelo digital de elevação da área de estudo, (a) Elevação do terreno e (b) Declividade do terreno.

