

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA**

TESE

**Biomassa Microbiana do Solo na Amazônia, Mata
Atlântica e Antártica**

Diego Campana Loureiro

2012



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA**

**BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO NA AMAZÔNIA, MATA
ATLÂNTICA E ANTÁRTICA**

DIEGO CAMPANA LOUREIRO

Sob a Orientação do Professor
Helvécio De-Polli

e co-orientação do Professor
Marcos Bacis Ceddia

Tese submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Doutor em**
Ciências, no Curso de Pós-Graduação em
Fitotecnia, Área de Concentração em
Agroecologia.

Seropédica, RJ
Março de 2012

631.41

L892b

T

Loureiro, Diego Campana, 1981-
Biomassa microbiana do solo na Amazônia,
Mata Atlântica e Antártica / Diego Campana
Loureiro - 2012.
97 f.: il.

Orientador: Helvécio De-Polli.

Tese(doutorado) - Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-
Graduação em Fitotecnia.

Bibliografia: f. 85-97.

1. Micoorganismos do solo - Amazônia -
Teses. 2. Micoorganismos do solo - Mata
Atlântica - Teses. 3. Micoorganismos do
solo - Antártida - Teses. 4. Humus -
Teses. 5. Solos - Teor de nitrogênio -
Teses. 6. Solos - Teor de carbono - Teses.
I. De-Polli, Helvécio, 1947-. II.
Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Curso de Pós-Graduação em
Fitotecnia. III. Título.

Bibliotecário: _____

Data: ___/___/____

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA**

DIEGO CAMPANA LOUREIRO

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Fitotecnia, área de Concentração em Agroecologia.

TESE APROVADA EM 22/03/2012

Helvécio De-Polli. (Ph.D.) EMBRAPA-CNPAB
(Orientador)

Raul de Lucena Duarte Ribeiro. (Dr.) UFRRJ/IA/FITOTECNIA

Ricardo Luis Louro Berbara. (Ph.D.) UFRRJ/IA/SOLOS

Adriana Maria de Aquino. (Dra.) EMBRAPA-CNPAB

Felipe Nogueira Bello Simas. (Ph.D.) UFV/IA/DPS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta Tese, em especial:

A minha esposa Mariana e minhas filhas Letícia e Joana, pelo encanto, carinho, companheirismo e amor, amigas especiais que levo no coração, meus amores – minha vida.

Aos meus pais e meu grande irmão pelo amor, pelos ensinamentos, apoio e confiança.

As pesquisadoras Adriana Aquino e Maria Elizabeth por minha inserção na pesquisa científica.

Ao querido amigo e orientador Helvécio, pela confiança, calma e a alegria que contagia a todos, e com ética me ensinou muito mais do que pesquisa.

Ao Bacis que me acolheu com muito humor e confiança, além de um excelente co-orientador é um grande amigo.

Aos pesquisadores Raul de Lucena e José Guilherme pelos ensinamentos da agroecologia e a dedicação ao SIPA que possibilitou diversos trabalhos sobre agricultura orgânica e manejo ecológico do solo.

Professores Schaefer e Simas, pelo total apoio no desenvolvimento de estudos na Antártica, pela confiança depositada e acima de tudo pela nova amizade.

UFRRJ por estes doze anos de convívio e aprendizagem.

Aos amigos da RURAL pela alegria de ser ruralino.

Departamento de Fitotecnia por possibilitar minha participação neste curso.

CNPq, CAPES e FAPERJ (Bolsa Nota 10) pelo apoio financeiro.

SIPA e seus funcionários, pelos ensinamentos práticos em agroecologia.

A BOGPM da PETROBRAS, pelo apoio logístico nos estudos na Amazônia.

Aos poloneses pelo excelente acolhimento e convívio na estação Antártica Henryk Arctowski.

A Marinha do Brasil, pelo apoio logístico nos estudos na Antártica.

Dedico este trabalho com muito esforço e saudades a vocês.

RESUMO GERAL

LOUREIRO, Diego Campana. **Biomassa Microbiana do Solo na Amazônia, Mata Atlântica e Antártica**. 2012. 97p. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Instituto de Agronomia, Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

Considerando que o conhecimento da biomassa microbiana do solo (BMS) é importante para o entendimento da dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS), o objetivo do presente trabalho foi contribuir com dados medidos em campo para aperfeiçoar as estimativas de BMS e a atividade respiratória do solo na Amazônia, Mata Atlântica e Antártica. Foram avaliados diferentes ecossistemas naturais e antropizados, dentre eles: florestas naturais e áreas com diferentes graus de antropização do solo na Amazônia; florestas remanescentes, pastagens, lavouras e áreas degradadas na Mata Atlântica; Tundra Antártica e áreas influenciadas por guano de pinguins na Antártica marítima. Em cada ecossistema determinou-se os teores de C associados à BMS, C solúvel em K_2SO_4 , respiração microbiana, quociente microbiano e metabólico. Determinaram-se também as frações granulométricas areia, silte e argila, umidade gravimétrica, bem como os atributos químicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , P_2O_5 , K^+ , C orgânico, Al^{3+} , CTC e pH em água). Os teores médios de BMS-C sob vegetação de Tundra Antártica e nos biomas tropicais na Amazônia e Mata Atlântica variaram em torno de 71 a 364 mg C kg^{-1} solo, com os maiores valores associados as pastagens na Mata Atlântica, florestas naturais na Amazônia e vegetações mais desenvolvidas na Tundra Antártica. No geral, em termos de tamanho ou estoque de C na BMS, a Tundra Antártica apresentou valor médio de BMS-C em torno do observado nas florestas tropicais, porém com uma atividade respiratória da BMS variando de $0,07$ a $0,3 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$, ou seja, de duas a sete vezes menor do que nas florestas tropicais (média de $0,50 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$). Coberturas de líquens, algas, briófitas e poucas plantas superiores na Tundra Antártica, são capazes de fixar o carbono atmosférico e incorporá-lo ao solo, sendo sua conservação auxiliada pelas baixas temperaturas que retardam a atividade microbiana e a mineralização da MOS. No entanto, valores discrepantes de BMS-C ($3486 \text{ mg C kg}^{-1}$ solo) e RBS ($1,6 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) foram observados na área de guano, demonstrando que o maior acúmulo de C e a maior atividade respiratória da BMS na Antártica estão associados a solos com influência de guano de colônias de pinguins, com cerca de 7 a 8 % do Corg total estocado na estrutura celular dos microrganismos. Este percentual é muito alto em relação ao observado nas florestas tropicais, com 1,1 a 2,7 % do Corg total estocado na BMS. Os ambientes propícios a alta saturação de água no solo desfavoreceram o acúmulo de BMS-C, constatado tanto na área de terço inferior de encosta sob floresta na Amazônia, quanto nos carpetes de musgos na Antártica. Nas áreas manejadas com lavouras, o uso frequente das práticas agrícolas de revolvimento do solo limitou o desenvolvimento da BMS e a sua atividade metabólica, ao contrário das pastagens não degradadas que aumentaram em 35 % a BMS-C em relação aos remanescentes florestais da Mata Atlântica. A elevada entrada de biomassa, a maior concentração de raízes no horizonte superficial do solo e a ausência de revolvimento do solo nas áreas de pastagens são as principais razões para essa maior quantidade de C acumulado na BMS. As áreas com baixos níveis de antropização apresentaram menor perda relativa de carbono pela respiração microbiana e repercutiu no baixo índice de quociente metabólico (qCO_2), ilustrando o seu papel na dinâmica de carbono nos ecossistemas terrestres.

Palavras-Chave: Matéria orgânica do solo, respiração microbiana, carbono solúvel.

GENERAL ABSTRACT

LOUREIRO, Diego Campana. **Soil Microbial Biomass in the Amazon, Atlantic Forest and Antarctica**. 2012. 97p. Thesis (Ph.D. in Crop Science). Institute of Agronomy, Crop Science Department, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

Considering that the knowledge of soil microbial biomass (SMB) is important for understanding the dynamics of soil organic matter (SOM), the objective of this study was to contribute to the measured data in the field to refine the estimates of SMB and respiration rates of soil in the Amazon, Atlantic Forest and Antarctica. We evaluated different anthropogenic and natural ecosystems, including: natural forests and areas with different degrees of anthropogenic impact on soil in the Amazon; remaining forests, pastures, crops and degraded areas in the Atlantic, Antarctic tundra, and areas influenced by penguin guano in the maritime Antarctic. In each ecosystem, it was measured the levels of C associated with the SMB, labile C soluble in K_2SO_4 solution, microbial respiration, microbial quotient and metabolic quotient. It was also determined mineral fractions of sand, silt and clay, gravimetric moisture content, as well as some chemical attributes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , P_2O_5 , K^+ , organic C, Al^{3+} , CEC and pH in water). The concentration of SMB in Antarctic tundra vegetation and tropical biomes in the Amazon and Atlantic forest ranged from 71 to 364 mg C kg^{-1} soil, with higher values associated with pastures in the Atlantic Forest area, natural forests in the Amazon, and under developed vegetation in the Antarctic Tundra. Overall, in terms of size or C stock in SMB, the Antarctic Tundra showed, in average, values of SMB similar to the values observed in the tropical forests, but with a respiratory activity of SMB ranging from 0.07 to 0.3 mg C- CO_2^{-1} kg soil h^{-1} , these values are two to seven times lower than in tropical forests (average of 0.50 mg C- CO_2 kg soil $^{-1}$ h^{-1}). Covers lichens, algae, bryophytes and few higher plants in Antarctica tundra are able to fix atmospheric carbon dioxide and incorporate it into the soil as organic matter where its conservation is aided by the low temperatures that slow down the microbial activity and SOM mineralization. However, outliers of SMB (3486 mg C kg^{-1} soil) and basal soil respiration (1.6 mg CO_2 -C kg^{-1} soil $^{-1}$ h^{-1}) were observed in the area of guano deposits, demonstrating that the greater accumulation of C and higher respiratory activity of SMB in Antarctica soil are associated with guano deposits originated from colonies of penguins, with about 7-8 % of the total organic C stored in the cell structure of microorganisms. This percentage is very high compared to those seen in tropical forests, with 1.1 to 2.7 % of total the organic C stored in the SMB. The environments with high soil water saturation did not favor the accumulation of SMB. These were found in the lower third of the slope in the Amazon forest, and in the carpets of mosses in Antarctica. In managed areas with crops, extensive use of soil tillage limited the development of SMB and its metabolic activity unlike the non-degraded-pasture soils which increased by 35 % the SMB in relation to the remaining Atlantic Forest. The high input of biomass, the highest concentration of roots in the surface soil horizon and the absence of soil disturbance in areas of pasture are the main reasons for this higher amount of C accumulated in the SMB. Areas with low levels of human disturbance had lower relative loss of carbon by microbial respiration consequently showing low rate of metabolic quotient (qCO_2), illustrating its role in carbon dynamics in terrestrial ecosystems.

Keywords: Organic matter, microbial attributes, soluble carbon and nitrogen.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Localização do Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA), Seropédica – RJ.....	11
Figura 2: Diferentes sistemas de cultivo orgânico de hortaliças no SIPA, Seropédica – RJ. .	12
Figura 3: Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos de BMS e frações mais lábeis da MOS, físicos e químicos do solo nos diferentes sistemas de manejo fitotécnico e cobertura vegetal, Seropédica - RJ.	22
Figura 4: Base de Operações Geólogo Pedro de Moura (BOGPM), Coari – AM, 2010.	29
Figura 5: Área de clareira reflorestada (ACR) e área de empréstimo de solo (AES) Coari - AM.....	30
Figura 6: Topossequência sob floresta natural (a: perfil P35 em topo de paisagem; b: perfil P55 no terço médio de paisagem; c: perfil P56 em terço inferior de encosta), Coari - AM.....	30
Figura 7: Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos de BMS dos diferentes sistemas de uso e cobertura vegetal do solo, Coari - AM.....	42
Figura 8: Localização dos diferentes ambientes de cobertura do solo, Antártica marítima....	60
Figura 9: Sistemas de cobertura do solo, Antártica marítima.	61
Figura 10: Laboratório móvel instalado na Estação Antártica de Pesquisa H. Arctowski, Antártica marítima.	62
Figura 11: Sistema automatizado LI-8100 (Licor) acoplado a colares de PVC instalados em cada ponto de amostragem, Antártica marítima.	63
Figura 12: Grade regular de amostragem, Antártica marítima.....	64
Figura 13: Fluxo de C-CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹) e temperatura média do ar (°C) sob diferentes ambientes durante o mês de fevereiro de 2011, Antártica marítima.	73
Figura 14: Fluxo de C-CO ₂ e temperatura do solo nas diferentes coberturas vegetais do solo durante o mês de fevereiro de 2011, Antártica marítima.	73
Figura 15: Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos químicos, granulométricos (areia, silte e argila) e de BMS nas diferentes coberturas do solo, Antártica marítima.....	76
Figura 16: Semivariogramas de carbono orgânico (Corg, a) e carbono solúvel (Csol, b) na área CMU, carbono solúvel (Csol, c) e fluxo de C-CO ₂ (d) na área CML, e carbono solúvel (Csol, e) e fluxo de C-CO ₂ (f) na área CMG, Antártica marítima.	78
Figura 17: Mapa de variabilidade espacial de Corg (g kg ⁻¹) (a) e Csol (mg C kg ⁻¹ solo) (b) na área de cobertura de musgo (CMU), Antártica marítima.	79
Figura 18: Mapa de variabilidade espacial de Csol (mg C kg ⁻¹ solo) (a) e fluxo de C-CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹) (b) na área de cobertura mista de líquens, briófitas e gramíneas (CML), Antártica marítima.....	80
Figura 19: Mapa de variabilidade espacial de Csol (mg C kg ⁻¹ solo) (a) e fluxo de C-CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹) (b) na área de cobertura mista de gramínea (CMG), Antártica marítima.	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Atributos de BMS e fração leve da MOS dos diferentes sistemas de uso e cobertura vegetal do solo, Seropédica - RJ.....	17
Tabela 2: Atributos de BMS e fração leve da MOS dos diferentes sistemas de manejo fitotécnico do solo, Seropédica - RJ.	17
Tabela 3: Atributos químicos e granulometria do solo dos diferentes sistemas de uso e cobertura vegetal, Seropédica - RJ.	17
Tabela 4: Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre os atributos do solo, Seropédica - RJ.....	18
Tabela 5: Autovalor, variância, contribuição da variável e contribuição do ambiente dos quatros componentes principais, Seropédica - RJ.	20
Tabela 6: Atributos de biomassa microbiana do solo sob diferentes ambientes nas épocas chuvosa e seca, Coari - AM.....	35
Tabela 7: Atributos químicos e as frações granulométricas areia, silte e argila do solo sob diferentes ambientes, Coari - AM.....	36
Tabela 8: Coeficiente de correlação linear de Pearson (r) dos atributos estudados, Coari - AM.....	38
Tabela 9: Autovalor, variância, contribuição da variável e contribuição do ambiente para os quatros componentes principais, Coari - AM.....	40
Tabela 10: Atributos de biomassa microbiana e fluxo de C-CO ₂ do solo sob diferentes ambientes, Antártica marítima.....	68
Tabela 11: Atributos químicos e granulométricos (areia, silte e argila) do solo sob diferentes ambientes, Antártica marítima.....	68
Tabela 12: Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre os atributos estudados, Antártica marítima.....	71
Tabela 13: Autovalor, variância, contribuição da variável e contribuição do ambiente dos quatros componentes principais, Antártica marítima.	75
Tabela 14: Valores teóricos estimados dos semivariogramas, Antártica marítima.....	77

ÍNDICE DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

MOS	matéria orgânica do solo
Corg	carbono orgânico (g kg^{-1})
Ntot	nitrogênio total (g kg^{-1})
C/N	relação Corg/Ntot
CTC	capacidade de troca catiônica (cmolc dm^{-3})
Ug	umidade gravimétrica (%)
BMS	biomassa microbiana do solo
BMS-C	carbono da biomassa microbiana do solo (mg C kg^{-1} solo)
BMS-N	nitrogênio da biomassa microbiana do solo (mg C kg^{-1} solo)
CNmic	relação BMSC/BMSN
CM:CO	relação BMSC/Corg conhecida como quociente microbiano (%)
NM:NT	relação BMSN/Ntot (%)
Clab	carbono lábil (mg C kg^{-1} solo)
Nlab	nitrogênio lábil (mg C kg^{-1} solo)
Csol	carbono solúvel em K_2SO_4 (mg C kg^{-1} solo)
Nsol	nitrogênio solúvel em K_2SO_4 (mg C kg^{-1} solo)
RBS	respiração microbiana ($\text{mgC-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$)
qCO ₂	quociente metabólico do solo ($\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1}\text{BM h}^{-1}$)
FLL	fração leve livre da MOS (g g^{-1})
FLI	fração leve intra-agregado da MOS (g g^{-1})
C-CO ₂	emissão de C-CO ₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
2 OBJETIVO GERAL.....	4
3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
4 CAPÍTULO I.....	5
BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO EM ÁREAS DE PASTAGEM, CULTIVO DE HORTALIÇAS E REMANESCENTE DA MATA ATLÂNTICA DE UM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROECOLÓGICA	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
4.1 INTRODUÇÃO.....	8
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	9
4.2.1 Área de estudo	9
4.2.2 Amostragem e caracterização da área	9
4.2.3 Análises de solo	12
4.2.4 Análise Laboratorial	12
a) Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo (BMS-C, BMS-N).....	12
b) Quociente microbiano do solo (CM:CO, NM:NT).....	13
c) Carbono e nitrogênio lábeis do solo (C_{lab} , N_{lab})	13
d) Respiração microbiana e quociente metabólico do solo (RBS, qCO_2)	13
e) Fração leve livre e intra-agregado da matéria orgânica do solo (FLL, FLI).....	14
f) Atributos químicos e granulométricos	14
4.2.5 Análise estatística descritiva e multivariada.....	14
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
4.3.1 Análise Descritiva	15
4.3.2 Análise de Componentes Principais (ACP).....	19
4.4 CONCLUSÕES	23
5 CAPÍTULO II.....	24
BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO EM ÁREAS COM DIFERENTES GRAUS DE ANTROPIZAÇÃO NA AMAZÔNIA	24
RESUMO	25
ABSTRACT	26
5.1 INTRODUÇÃO.....	27
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	28
5.2.1 Local de estudo.....	28
5.2.2 Clima	28
5.2.3 Amostragem e caracterização das áreas	28
5.2.4 Análises de solo	30

5.2.5	Análise laboratorial	31
a)	Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo (BMS-C, BMS-N)	31
b)	Quociente microbiano do solo (CM:CO)	31
c)	Carbono e nitrogênio solúveis do solo (Csol, Nsol)	31
d)	Respiração microbiana e quociente metabólico do solo (RBS, qCO ₂)	31
e)	Atributos químicos e granulométricos	32
5.2.6	Análise estatística descritiva e multivariada	32
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.3.1	Análise descritiva	33
5.3.2	Análise de componentes principais (ACP)	39
5.4	CONCLUSÕES	43
5.5	ANEXO 1	44
5.5.1	Perfil P035	44
5.5.2	Perfil P055	47
5.5.3	Perfil P056	50
6	CAPÍTULO III	53
	BIOMASSA MICROBIANA E EMISSÕES DE C-CO ₂ EM SOLOS AFETADOS POR PERMAFROST NA ANTÁRTICA MARÍTIMA	53
	RESUMO	54
	ABSTRACT	55
6.1	INTRODUÇÃO	56
6.2	MATERIAL E MÉTODOS	58
6.2.1	Área de estudo	58
6.2.2	Clima e vegetação	58
6.2.3	Ambientes avaliados	58
6.2.4	Coleta de amostras	61
6.2.5	Análises laboratoriais	62
6.2.6	Emissões de CO ₂ do solo	63
6.2.7	Monitoramento térmico-hídrico do solo e da temperatura do ar	63
6.2.8	Variabilidade espacial dos atributos de Corg, BMS e emissões de CO ₂ do solo	64
6.2.9	Análise estatística descritiva e multivariada	65
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
6.3.1	Análise descritiva	66
6.3.2	Emissões de C-CO ₂ e variação térmica do solo	72
6.3.3	Análise de Componentes Principais	74
6.3.4	Análise de Variabilidade Espacial	77
6.4	CONCLUSÕES	82

7 CONCLUSÕES GERAIS	83
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

INTRODUÇÃO GERAL

Os ecossistemas naturais apresentam uma integração equilibrada entre a cobertura vegetal e os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, decorrente de processos essenciais de ciclagem de nutrientes, acumulação e decomposição da matéria orgânica. Atualmente, esta integração está ameaçada pelas atividades antrópicas e pelo efeito estufa em consequência do aquecimento global, podendo o compartimento “solo” atuar como fonte ou dreno de carbono (C).

Os biomas ou ecossistemas terrestres estocam globalmente 2.477 Pg C (Pg = Petagrama = 10^{15} g) considerando as plantas e o solo até a profundidade de 1 m (JAZEN, 2004; IPCC, 2001; DAVIDSON & JANSSENS, 2006; WATSON et al., 1990). Deste reservatório de C no solo, cerca de 1.550 Pg está na forma de C orgânico e 950 Pg na forma de C inorgânico (LAL, 2006). Quando se consideram apenas os 30 cm superficiais de solo, o estoque de C fica em torno de 800 Pg (CERRI et al., 2006a), ou seja, quase a mesma quantidade armazenada no compartimento atmosférico (760 Pg C segundo LAL, 2004).

Estima-se que a metade do C estocado no solo, considerando a profundidade de 1 m, cerca de 787 Pg é referente aos solos de florestas (DIXON et al., 1994), enquanto as áreas de pastagens contêm cerca de 500 Pg (SCHARPENSEEL, 1997), e as de cultivo agrícola, 170 Pg de C (PAUSTIAN et al., 2000). Só nas florestas tropicais, 212 Pg C está estocado nas plantas e 216 Pg C nos solos, distribuídos em uma área de $1,76 \times 10^9$ ha. Estimativas realizadas para todo o território do Brasil (8,5 milhões de km^2) mostraram estoques de C de 105 Pg no solo até 2 m de profundidade, o que corresponde aproximadamente a 40 % de todo o C armazenado nos solos da América Latina (BERNOUX & VOLKOFF, 2006). Só a Amazônia Brasileira (4,5 milhões de km^2) teria um potencial de seqüestrar C atmosférico na ordem de 421 a 470 Tg ano^{-1} ($\text{Tg} = \text{Teragrama} = 10^{12}$ g); desse total, cerca de 30 % (126 a 141 Tg ano^{-1} de C) seria acumulado pelo solo, e os 70 % restantes (295 a 329 Tg ano^{-1} de C), devido à biomassa aérea (CERRI et al., 2006b). Já estimativas realizadas por MELLO et al. (2006) avaliando o potencial de sequestro de C com mudanças no uso da terra na região da Mata Atlântica e considerando a camada de 0 a 20 cm de profundidade do solo, indica aumento de 144 a 154 Tg ano^{-1} de C, chegando a um potencial de sequestro de C de 3 Pg C, após 20 anos.

É muito significativo o fato de existir mais carbono no solo do que na atmosfera, mostrando a importância que o compartimento “solo” pode ter sobre o efeito estufa em consequência do aquecimento global. Estima-se que a temperatura atmosférica da superfície global, para o final deste século, poderá aumentar em até 6,4 °C, dependendo do cenário (IPCC 2007a). Com isso existe a possibilidade de que um aumento na temperatura possa levar os microrganismos a mineralizarem mais rapidamente a matéria orgânica do solo (MOS), liberando assim uma quantidade maior de CO_2 e potencializando o efeito estufa (KNORR et al., 2005) através de uma retroalimentação positiva.

No cenário presente de aquecimento global, pouco se sabe sobre o efeito do aumento da temperatura na biomassa microbiana do solo (BMS) e emissões de CO_2 de solos. Existe uma demanda científica por estudos focados na dinâmica do carbono e emissões de CO_2 nos ecossistemas terrestres, principalmente aqueles relacionados a solos afetados por *permafrost*, pois constituem um importante reservatório de carbono dos ecossistemas terrestres e, com o aumento da temperatura global, este reservatório pode passar da condição de dreno a fonte de carbono para a atmosfera como no caso dos solos do Ártico.

Solos com *permafrost* têm como principal característica a presença de horizontes que permanecem congelados por mais de dois anos consecutivos (SCHAEFER et al., 2008; SIMAS et al., 2008; KIMBLE, 2004), sendo um dos elementos da criosfera. A criosfera é definida como um subsistema terrestre que se caracteriza pela presença de neve, gelo e *permafrost*, possuindo um papel vital nas mudanças ambientais atuais.

Geralmente solos com *permafrost* ocorrem em altas latitudes (> 60 ° sul e norte), principalmente no ecossistema de Tundra, onde é esperado maior efeito do aquecimento. O bioma Tundra, ocupa uma área de $0,95 \times 10^9$ ha, o equivalente a 6,3 % da área total dos ecossistemas terrestres do planeta, com 6 Pg C armazenado na biomassa vegetal e 121 Pg C estocado nos solos até a profundidade de 1 m (JAZEN, 2004; IPCC, 2001; WBGU, 1998; AJTAY et al., 1979). Solos com *permafrost* cobrem 20% da superfície do planeta e possuem, reconhecidamente, uma grande capacidade potencial de emissão de gases de efeito estufa (CO₂, CH₄ e N₂O), influenciando toda a dinâmica climática da Terra (SLAYMAKER & KELLY, 2007). Estima-se que o “pool” de carbono estocado nos solos com *permafrost* do planeta até a profundidade de 3 m seja de 400 Pg de C (GRUBER et al., 2004; DAVIDSON & JANSSENS, 2006).

Uma estimativa sugere que o aquecimento global pode derreter 25 % da área de *permafrost* no ano de 2100 (ANISIMOV et al., 1999), tornando assim cerca de 100 Pg C vulneráveis à perdas (GRUBER et al., 2004). Porém, este cenário pessimista de aumento das emissões de CO₂ do solo, com um possível aquecimento global, pode ser contra-balanceado por uma atividade fotossintética mais intensa e eficiente das plantas, fixando mais carbono e aumentando o seu estoque no solo através da maior deposição de matéria orgânica ao solo.

Uma grande fonte de incerteza, segundo ZHANG et al. (2005), é o efeito do aquecimento sobre os microrganismos do solo, que exercem influência no balanço líquido de C nos ecossistemas terrestres por meio do controle da decomposição da matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes para as plantas. O interesse por este assunto vem crescendo devido a importância da BMS no ciclo global do carbono, pois os microrganismos além de representar um reservatório de C do solo, atuam na mineralização da matéria orgânica do solo (MOS) com potencial de realimentação das mudanças climáticas devido ao provável aumento da temperatura do planeta.

Segundo os modelos aplicados por KNORR et al. (2005), que consideram três reservatórios de C no solo, do mais lábil para o mais recalcitrante à decomposição, conhecidos como de ciclagem rápida (MOS com maior teor de nitrogênio e menor conteúdo de lignina), passiva (MOS com menor teor de nitrogênio e maior conteúdo de lignina) e lenta (MOS com teor de nitrogênio e conteúdo de lignina intermediários), a degradação do compartimento lento da MOS se torna mais sensível à mudança da temperatura do que a matéria orgânica mais disponível aos microrganismos, causando assim um feedback positivo sobre o aquecimento global.

Todavia, o impacto deste aumento projetado de temperatura sobre o balanço de C do solo e na economia de C nos ecossistemas terrestre não são claros. Apesar de muitas pesquisas realizadas, ainda não surgiu um consenso sobre a influência da temperatura na decomposição e dinâmica do carbono do solo. Esclarecer o efeito da temperatura na dinâmica do carbono é particularmente difícil, porque os diversos compostos orgânicos do solo exibem uma ampla gama de propriedades cinéticas, que determinam a intrínseca sensibilidade da temperatura na sua decomposição (DAVIDSON & JANSSENS, 2006).

Para avaliar a dinâmica de fonte e dreno de carbono do solo nos ecossistemas terrestres, é fundamental avaliar a biomassa microbiana (BMS) e sua atividade respiratória (RBS), que constitui um dos reservatórios de carbono da matéria orgânica do solo (MOS), e segundo SMITH & PAUL (1990), contém, em média, de 2 a 5% do carbono e até 5% do nitrogênio total nos solos tropicais.

A BMS, conceitualmente, é a parte viva da MOS, incluindo bactérias, actinomicetos, fungos, protozoários, algas e microfauna, e excluindo-se raízes de plantas e animais maiores do que $5 \cdot 10^3 \mu\text{m}^3$ (JENKINSON & LADD, 1981). É o principal agente nos ciclos biogeoquímicos dos ecossistemas terrestres (PAUL & VORONEY, 1980). Este atributo do solo interfere na produtividade dos ecossistemas, regulando a taxa de decomposição da

matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes e o fluxo de energia dentro do solo (MARCHIORI JUNIOR & MELO, 1999), além de contribuir com as emissões de CO₂.

Informações sobre a biomassa microbiana do solo e sua atividade em zonas temperadas e tropicais tem aumentado consideravelmente (PARKINSON & COLEMAN, 1991; KASCHUK et al., 2010 e 2011). Em contraste, medidas de BMS na Antártica são escassas. Apesar de existirem poucos estudos sobre a BMS e a atividade respiratória dos microrganismos nos ecossistemas terrestres da Antártica, medidas de BMS na Antártica vêm sendo realizadas desde a década de 1970 e o número de estudos tem aumentado consideravelmente (HOLDING et al, 1974; ROSER et al, 1993; BOLTER, 1994; LAVIAN et al., 2001; COWAN et al., 2002; TSCHERKO et al., 2003).

Com o aumento da latitude ocorre o declínio da temperatura e da precipitação pluviométrica, reduzindo de forma crítica a composição e atividade biológica, o fluxo e a produção primária das plantas, e a disponibilidade de nutrientes variando consideravelmente com a estacionalidade de temperatura, umidade e atividade microbiana (ALBUQUERQUE et al., 2004). Apesar das condições extremas de clima na Antártica, coberturas microfíticas de líquens, algas, briófitas e raras plantas superiores são capazes de fixar o carbono atmosférico e incorporá-lo ao solo, sendo sua conservação auxiliada pelas baixas temperaturas que retardam a mineralização (SIMAS et al., 2004).

Atualmente, as pesquisas estão focadas nas mudanças que estão ocorrendo nas regiões polares e na análise da sua importância ambiental e econômica para o planeta. A Antártica é o regulador térmico do planeta, sendo tão importante quanto a Amazônia e a Mata Atlântica para o clima sul-americano, necessitando de trabalhos relativos ao monitoramento da dinâmica da BMS e sua atividade respiratória, com implicações ao sequestro de carbono e emissões de C-CO₂. Para prever as respostas de produtividade primária em relação às mudanças nos teores de carbono do solo, é necessário melhor compreensão da dinâmica da matéria orgânica e atividade microbiana nos ecossistemas terrestres.

2 OBJETIVO GERAL

Considerando que o conhecimento da BMS é importante para o melhor entendimento da dinâmica da MOS e emissões de CO₂, o objetivo do presente trabalho foi contribuir com dados medidos em campo para aperfeiçoar as estimativas de BMS e a sua atividade respiratória em diferentes ecossistemas na Amazônia, Mata Atlântica e Antártica.

3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar a biomassa microbiana do solo (BMS) em áreas com diferentes graus de antropização e em uma toposequência sob floresta natural da Amazônia na província petrolífera Base de Operações Geólogo Pedro de Moura (BOGM) durante as estações chuvosa e seca.
2. Avaliar a influência do manejo fitotécnico e cobertura vegetal do solo na BMS e frações lábeis da MOS, com a possibilidade de prognóstico sobre o destino do C orgânico do solo. Espera-se contribuir para ampliar o uso da biomassa microbiana e sua atividade respiratória como indicador de perdas ou sequestro de carbono do solo, devido a sua vital participação em vários processos terrestres com implicações generalizadas na ciclagem de nutrientes.
3. Estudar a BMS e as emissões de C-CO₂ no verão em solos ornitogênicos afetados por *permafrost* na Antártica marítima. Além disso, buscou-se verificar o nível de dependência espacial de atributos de BMS em diferentes coberturas vegetais do solo na Tundra Antártica, com o intuito de reconhecer o seu padrão de variabilidade espacial.

4 CAPÍTULO I

BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO EM ÁREAS DE PASTAGEM, CULTIVO DE HORTALIÇAS E REMANESCENTE DA MATA ATLÂNTICA DE UM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROECOLÓGICA

RESUMO

O objetivo do estudo foi avaliar a influência do manejo fitotécnico e da cobertura vegetal do solo na biomassa microbiana e frações lábeis da matéria orgânica do solo (MOS), com a possibilidade de prognóstico sobre o destino do carbono orgânico do solo em um sistema integrado de produção agroecológica. Foram estudadas diferentes áreas de lavoura sob cultivo orgânico de hortaliças (cultivo intensivo, cultivo mínimo e cultivo rotacionado); áreas de pastagens de *Paspalum notatum* (PAS); remanescentes florestais da Mata Atlântica (RMA); e áreas degradadas (ADR). Três amostras compostas de solo foram coletadas em cada área a uma profundidade de 0-10 cm em Argissolo Vermelho-Amarelo. Em cada amostra determinou-se os teores de C e N associados à BMS, C e N lábeis, fração leve livre e intra-agregado da MOS, respiração microbiana, quociente microbiano e quociente metabólico. Determinaram-se também as frações granulométricas areia, silte, argila, umidade gravimétrica, bem como os atributos químicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , P_2O_5 , K^+ , C orgânico, N total, Al^{3+} , CTC e pH em água). A área de pastagem apresentou o maior acúmulo de carbono da biomassa microbiana do solo (BMS), com 384 mg C kg^{-1} solo, cerca de 35 % acima dos valores observados nos remanescentes florestais da Mata Atlântica, o que foi atribuído ao intenso desenvolvimento e ciclagem do sistema radicular das gramíneas forrageiras na camada superior do solo, região que ocorre maior concentração de microrganismos. Cerca de 2 % do total de Corg orgânico está estocado na BMS nas áreas de pastagens. A introdução de práticas agrícolas no sistema de lavoura afetou consideravelmente os teores de BMS-C, apresentando redução média de 30% com relação aos remanescentes florestais. O quociente metabólico (qCO_2) indicou perdas de C do solo para as áreas manejadas com culturas agrícolas, e dentre os diferentes sistemas de cultivo agrícola, maiores perdas de C foram observados nas áreas manejadas com culturas de ciclo curto, com uso freqüente de aração e gradagem, alertando para a procura de sistemas de manejo que minimizem o revolvimento do solo e priorizem a manutenção da cobertura vegetal. A área degradada foi o ambiente que mais contribuiu para a separação dos grupos de análise multivariada, mostrando ser a área mais discrepante em relação à atividade microbiana e teores de MOS. As variáveis com maior peso na formação dos agrupamentos foram o teor de argila e a relação C/N microbiana, mostrando a importância do uso da BMS e atributos granulométricos do solo na distinção de diferentes sistemas de manejo fitotécnico e cobertura vegetal do solo, ampliando a possibilidade de prognóstico sobre o destino do carbono orgânico do solo.

Palavras chave: Quociente metabólico, quociente microbiano e análise de componentes principais.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the influence of the plant management and soil vegetation cover in the microbial biomass and labile soil organic matter (SOM) levels, with the possibility of prediction about the fate of soil organic carbon in the Atlantic Forest biome. We studied different crop areas under organic cultivation of vegetables (intensive cultivation, minimum tillage and crop rotation), grazing areas of *Paspalum notatum* (PAS); remaining fragments of Atlantic Forest (RMA), and degraded soil areas (ADR). Three composite soil samples were collected in each area to a depth of 0-10 cm in a Red Yellow Podzolic soil. In each sample we determined the levels of C and N associated with the SMB, labile C, labile N, free light fraction and intra-aggregate SOM, microbial respiration, microbial quotient and metabolic quotient. It was also determined mineral fractions as sand, silt, and clay, gravimetric moisture content, as well as the chemical attributes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , P_2O_5 , K^+ , organic C, total N, Al^{3+} , CEC and pH in water). The pasture area had the highest accumulation of carbon in the soil microbial biomass (SMB) with 384 mg C kg⁻¹ soil, about 35% above the level seen in the remaining Atlantic Forest fragments, which was attributed to the intense development and cycling of the root system of grasses in the upper soil layer, a horizon with higher concentration of microorganisms. About 2% of total organic C is stored in the SMB in pasture areas. The introduction of agricultural practices in farming system considerably affected the levels of SMB, showing reduction average of 30% compared to the remaining forest fragments. The metabolic quotient (qCO₂) indicated losses of soil C for the managed areas with crops, and among the different systems of agriculture, greater losses of C were observed in areas managed with short cycle crops, with frequent use of plowing and harrowing, prompting the search for management systems that minimize soil disturbance and prioritize the maintenance of vegetation cover. The degraded soil area was the environment that contributed the most to the separation of the multivariate groups, showing the area of higher differences for the microbial activity and SOM levels. The attributes with higher importance in the multivariate grouping were clay content and the microbial C/N ratio showing the significance of the use of SMB and soil texture attributes in distinguishing between different crop management systems and soil vegetation cover, showing the prediction potential for the fate of soil organic carbon.

Keywords: metabolic quotient, microbial quotient and principal component analysis.

4.1 INTRODUÇÃO

A redução das áreas sob floresta nativa da Mata Atlântica devido a expansão das áreas agrícolas cultiváveis promove o declínio da matéria orgânica do solo (MOS) e a perda do potencial produtivo (SILVA et al., 2007). Atualmente os sistemas de produção agrícola buscam práticas de manejo que priorizem a manutenção da MOS. Alguns sistemas de uso e manejo do solo, como o sistema de cultivo mínimo, o plantio direto, o reflorestamento, o manejo das pastagens, entre outros, podem alterar consideravelmente os estoques de C e a emissão de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, ser importante no que se refere à mitigação do aquecimento global do planeta (CARVALHO, et al., 2010).

Em contraste, as práticas agrícolas intensivas diminuem consideravelmente o estoque de carbono no solo. KASCHUK et al., (2011), apontam para o fato de que a introdução de práticas agrícolas nos biomas do Brasil, cobertos anteriormente com vegetação natural, afetaram o conteúdo de carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C), com uma diminuição global de 31%. Culturas anuais reduziram mais severamente a BMS e o conteúdo de carbono orgânico do solo, com uma diminuição média de 53% no BMS-C. No entanto, segundo estes autores cada bioma reagiu de maneira diferente, ou seja, a perturbação do solo seguiu uma ordem de diminuição do BMS-C (Cerrado > Amazônia > Caatinga > Floresta Atlântica).

Em regiões de clima tropical, as condições climáticas favorecem a decomposição da MOS, armazenando menos C no solo em relação a regiões de clima temperado. Apesar dessa maior taxa de decomposição de MOS, os solos em regiões de clima tropical estocam 32 % do total de C orgânico contido nos solos do planeta (ESWARAN et al., 1993). Neste caso, a produção agrícola é dependente da biomassa microbiana, que atua na mineralização e ciclagem dos nutrientes da MOS.

A MOS pode ser dividida em compartimentos lábeis e estáveis. Esta classificação é baseada na suscetibilidade diferenciada das frações à decomposição microbiana, o que permite um melhor entendimento da dinâmica da MOS (SILVA & RESCK, 1997). Os constituintes lábeis da MOS incluem serrapilheira, fração leve da MOS, substâncias não-humificadas não associadas aos componentes minerais, formas de C solúveis em água, C associado aos macrorganismos e à BMS.

Segundo GAMA-RODRIGUES & GAMA-RODRIGUES (2008), a biomassa microbiana pode ser enquadrada como o compartimento central do ciclo do C e representa considerável reservatório de nutrientes nos solos e atributo fundamental para o estudo de ciclagem de nutrientes. Já a fração leve (FL), correspondente à matéria orgânica não complexada, divide-se em: leve livre (FLL) - constituída por materiais orgânicos derivados principalmente de restos de vegetais, mas que contêm quantidades de resíduos microbianos e da microfauna e apresenta rápida taxa de transformação; e leve intra-agregado (FLI) - constituída de parte da FL incorporada e fisicamente estabilizada em macroagregados (> 250 µm), compreendendo um variado conjunto de compostos orgânicos, com tamanho reduzido e grau de decomposição mais avançado em comparação a FLL (PINHEIRO et al., 2004).

O objetivo do estudo foi avaliar a influência do manejo fitotécnico e cobertura vegetal do solo na BMS e frações lábeis da MOS, com a possibilidade de prognóstico sobre o destino do C orgânico do solo. Espera-se contribuir para ampliar o uso da biomassa microbiana e sua atividade respiratória como indicador de perdas ou seqüestro de carbono do solo, devido a sua vital participação em vários processos terrestres com implicações generalizadas na ciclagem de nutrientes.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Área de estudo

O estudo da biomassa microbiana (BMS) e constituintes lábeis da matéria orgânica do solo (MOS) foi realizado em Argissolo Vermelho-Amarelo no Sistema Integrado de Produção Agroecológica-SIPA, denominado “Fazendinha Agroecológica km 47” (Figura 1). O SIPA está localizado em Seropédica, Estado do Rio de Janeiro, em área de 59 ha, e está situado na latitude 22° 45’S, longitude 43° 41’W Grw. e altitude de 33 metros, sendo o clima na classificação de Köppen como do tipo Aw (NEVES et al., 2005). O clima da região é tropical, com verões úmidos e invernos secos. A temperatura média anual é cerca de 23,5 °C e precipitação média de 1.275 mm, sendo os meses de julho e agosto os mais secos.

O SIPA é conduzido em parceria entre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), através do Centro Nacional de Pesquisa de Agrobiologia, a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRuralRJ) e a Empresa de Pesquisa Agropecuária do estado do Rio de Janeiro (Pesagro) (ALMEIDA et al., 1999). Este sistema de produção representa um espaço destinado ao exercício da agroecologia, com um histórico de 15 anos desenvolvendo experimentos que visam à manutenção da MOS. É importante ressaltar que todos os sistemas de cultivo no SIPA, seguem as normas legislativas de agricultura orgânica estabelecidas pelo Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL - MAPA, 2009).

4.2.2 Amostragem e caracterização da área

As amostras foram coletadas na estação chuvosa (dezembro de 2009), em áreas de lavouras sob diferentes sistemas de cultivo orgânico de hortaliças (Figura 2), pastagem, remanescente florestal da Mata Atlântica e área degradada. A localização das áreas encontra-se na Figura 1, abaixo segue a descrição detalhada das áreas:

1) **Sistemas de cultivo orgânico de hortaliças (LAV):** são caracterizados pela semeadura de outono-inverno e rotação com milho e arroz na primavera-verão, com uso de gramíneas e/ou leguminosas como adubos verdes. Adubação orgânica de pré-cultivo com esterco bovino produzido no SIPA e adubação orgânica de cobertura com torta de mamona, cultivos irrigados (período seco do ano), capina manual com enxada e uso de defensivos alternativos (caldas bordalesa e sulfocálcica). Três sistemas de cultivo foram avaliados, sendo eles:

1.1) **Sistema I (CI):** cultivo intensivo e diversificado de hortaliças, com predomínio de folhosas (alface, chicória, espinafre, rúcula, condimentares – gengibre e manjeriço, salsa, coentro e cebolinha) e algumas espécies tuberosas (cenoura, beterraba) e (pepino e vagem anã-arbustiva). A área é mecanicamente preparada com misturador e enxada rotativa, com re-encanteiramento e plantios sucessivos até o início do verão. Durante a época quente, a área é cultivada com milho para colheita de espigas verdes em consórcio com leguminosas (mucuna/crotalária) para adubação verde.

1.2) **Sistema II (CM):** Cultivo mínimo de pimentão, com preparo mecanizado do solo apenas na linha de plantio, mantendo-se as entrelinhas permanentemente cobertas com a vegetação espontânea, predominando o capim coloninho (*Panicum maximum*), periodicamente roçado. Em seguida à colheita do pimentão, a área é mantida com leguminosas adubos verdes, até o período de hortaliças no ano seguinte.

1.3) **Sistema III (PD):** cultivo rotacionado de batatinha (*Solanum tuberosum*), sendo que após preparo mecanizado do solo (aração e gradagem convencionais), a área é

cultivada com milho e leguminosas adubos verdes. Após a colheita dos grãos, o solo é novamente preparado com encanteirador acoplado ao trator. Em sequência imediata, a batatinha é plantada e a lavoura manejada através de capina e amontoa antecedendo à tuberação.

2) **Pastagem (PAS)**: três áreas de solo coberto com grama-batatais (*Paspalum notatum*), sendo Pa localizado em área de baixada, Pb e Pc em área de encosta próximo a remanescente florestal da Mata Atlântica.

3) **Remanescente florestal da Mata Atlântica (RMA)**: três áreas de regeneração natural de Floresta Ombrófila densa em estágio de capoeira, localizadas no SIPA e redondezas.

4) **Área degradada (ADR)**: três áreas degradadas pelo uso intensivo do solo, apresentando solo exposto, ou seja, sem cobertura vegetal nos pontos amostrados, localizadas fora do SIPA.

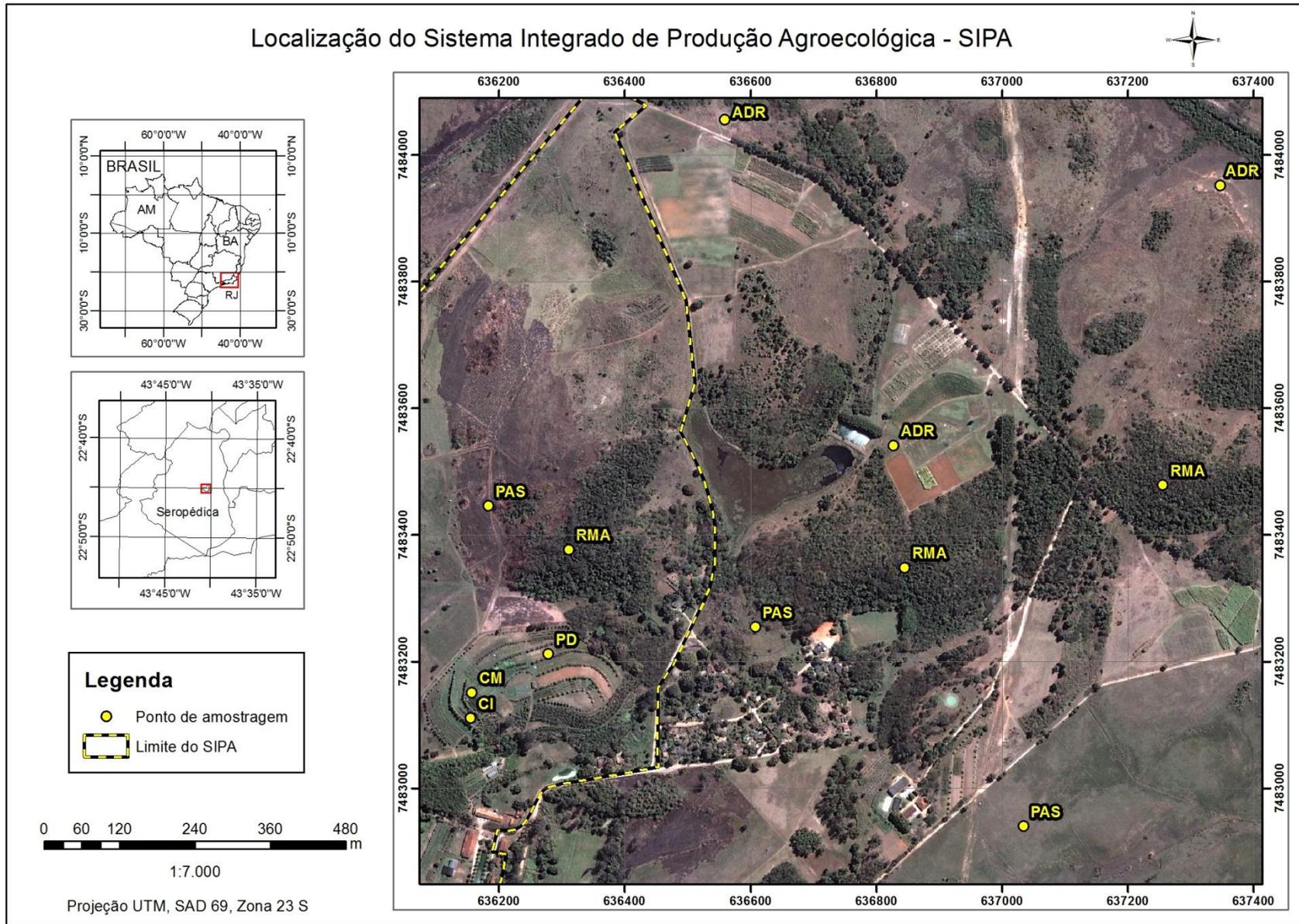


Figura 1: Localização do Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA), Seropédica – RJ.

CI)



CM)



PD)



Figura 2: Diferentes sistemas de cultivo orgânico de hortaliças no SIPA, Seropédica – RJ.

CI: cultivo intensivo sob manejo orgânico de produção; CM: cultivo mínimo sob manejo orgânico de produção; PD: cultivo rotacionado sob manejo orgânico de produção.

4.2.3 Análises de solo

Em cada amostra determinou-se os teores de C e N associados à BMS, C e N solúveis em K_2SO_4 , respiração microbiana (RBS) e quociente microbiano (CM:CO) e metabólico (qCO_2). Determinaram-se também as frações granulométricas areia, silte, argila, umidade gravimétrica, bem como os atributos químicos cálcio, magnésio, fósforo, potássio, carbono orgânico, alumínio, CTC e pH em água.

4.2.4 Análise Laboratorial

a) Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo (BMS-C, BMS-N)

A determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C) foi determinada por meio do método da fumigação-extração, proposto por VANCE et al. (1987). Os procedimentos em laboratório seguiram o protocolo descrito por DE-POLLI & GUERRA (1999) e SILVA et al. (2007b), com a relação solo extrator 1:2,5 segundo TATE et al. (1988) e $Kc=0,33$ preconizado por SPARLING & WEST (1988),

realizando fumigação com adição de clorofórmio (isento de etanol) diretamente na amostra, como descrito por BROOKES et al. (1982) e WITT et al. (2000), mantendo-as em local escuro por 24 horas, procedendo-se a extração e quantificação do carbono microbiano pelo método (WALKLEY & BLACK, 1934) modificado segundo TEDESCO et al. (1995), sem aquecimento externo em chapa.

A determinação do nitrogênio da biomassa microbiana do solo (BMS-N) foi determinada por meio do método da fumigação-extração, proposto por VANCE et al. (1987). Os procedimentos em laboratório seguiram o protocolo descrito por SILVA et al. (2007a), com a relação solo extrator 1:2,5 segundo TATE et al. (1988) e $K_n = 0,54$ (BROOKES et al., 1985) realizando fumigação direta com adição de clorofórmio (isento de etanol) diretamente nas amostras (BROOKES et al., 1982; WITT et al., 2000), mantendo-as em local isento de luminosidade por 24 horas, procedendo-se, após extração, a quantificação do nitrogênio microbiano por destilação de arraste de vapor (Kjeldahl), seguida de volumetria de neutralização ácido-base empregando ácido sulfúrico como titulante (ALVES et al., 1994).

Através do carbono e do nitrogênio da biomassa microbiana foi calculada a relação C/N microbiana (CN_{mic}).

b) Quociente microbiano do solo (CM:CO, NM:NT)

A relação entre o carbono microbiano e o carbono orgânico (CM:CO) e a relação entre o nitrogênio microbiano e o nitrogênio total (NM:NT), foram calculadas de acordo com SPARLING (1992).

c) Carbono e nitrogênio lábeis do solo (C_{lab}, N_{lab})

O carbono e o nitrogênio lábeis do solo (carbono e nitrogênio solúveis em água; C_{lab} e N_{lab}) foram determinados por meio do método de extração a quente em autoclave, segundo SPARLING et al. (1998) e BAKER, et al. (1998), utilizando-se 4g de TFSA, em recipiente de vidro de 100cm³, acrescentando-se 40ml de água destilada. Em seguida as amostras foram autoclavadas a 100°C (autoclave com pressão reduzida) por 1 hora. Após o resfriamento, a quantificação do carbono e nitrogênio foi determinada seguindo o método proposto por VANCE et al. (1987) e TATE et al. (1988) para biomassa microbiana, conforme descrito no item anterior.

d) Respiração microbiana e quociente metabólico do solo (RBS, qCO₂)

A atividade microbiana foi determinada mediante a quantificação da evolução de CO₂ por meio da metodologia proposta por JENKINSON & POWLSON (1976). Os procedimentos em laboratório seguiram o protocolo descrito por SILVA et al. (2007c).

O quociente metabólico (qCO₂) foi calculado pela razão entre o C-CO₂ da respiração microbiana e o C da biomassa microbiana (BMS-C) das amostras, conforme ANDERSON & DOMSCH (1993). A atividade microbiana (RBS) quando relacionada à biomassa microbiana e ao tempo de incubação, denomina-se respiração específica ou quociente metabólico (índice qCO₂) (ANDERSON & DOMSCH, 1985, 1990). A combinação das medidas da biomassa microbiana e respiração do solo fornecem a quantidade de CO₂ evoluída por unidade de biomassa, denominada quociente metabólico (qCO₂).

e) Fração leve livre e intra-agregado da matéria orgânica do solo (FLL, FLI)

A fração leve livre da matéria orgânica foi obtida pelo procedimento proposto por SOHI et al. (2001). Esta fração foi extraída do solo por meio de uma solução de NaI a uma densidade de $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ ($\pm 0,02$), conforme sugerido por JANZEN et al. (1992). Foram pesados 5 g de TFSA em frascos de centrífuga de 50 ml, sendo adicionados 35 ml de iodeto de sódio (NaI, $d = 1,80 \text{ g cm}^{-3}$). Os frascos foram agitados manualmente por 30 segundos de maneira que as frações orgânicas menos densas ficassem na superfície da solução. A fração orgânica sobrenadante presente na solução (fração leve livre) foi succionada juntamente com a solução de NaI, e imediatamente, separada por filtração a vácuo (Sistema Asséptico Sterifil, 47 mm – Millipore) com filtros de fibra de vidro (47 mm de diâmetro; 2 microns – Whatman tipo GF/A), previamente pesados. A fração orgânica, juntamente com o filtro, foi, posteriormente, seca a 65° e pesada. Após a remoção da fração leve livre (FLL), foi extraída a fração leve intra-agregado (FLI) ou oclusa, aplicando vibração com o emprego de ultra-som (modelo 250/450 Sonifier) por 3 min com pulsações de intervalo de um segundo, a uma energia de 400 J mL^{-1} na solução de NaI. Após o tratamento com ultra-som, as amostras foram novamente centrifugadas a 18.000 rpm por 15 min, sendo FLI coletada em filtros, seca e pesada.

f) Atributos químicos e granulométricos

A análise granulométrica (areia, silte e argila) e a quantificação do Corg, Ca, Mg, P, K e Al foi realizada com terra fina seca ao ar (TFSA), segundo EMBRAPA (1997). O nitrogênio total do solo foi determinado segundo BREMNER & MULVANEY (1982).

4.2.5 Análise estatística descritiva e multivariada

Inicialmente foi feita a análise estatística descritiva, bem como de correlação de Pearson, através do software XLSTAT 7.5 (ADINSOFT, 2004).

Para a análise de componentes principais (ACP) as amostras ou ambientes (PAS, LAV, RMA, ADR) e as variáveis (atributos de BMS, químicos e granulométricos do solo) foram transformadas em coordenadas que correspondem à sua projeção nos eixos de ordenação, ou autovetores, representando o peso de cada variável sobre cada componente (eixo) e funcionando como coeficiente de correlação. A análise de componentes principais (ACP) foi feita utilizando os programas XLSTAT 7.5 (ADINSOFT, 2004) e CANOCO 4.5 (TER BRAAK & SMILAUER, 2002).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Análise Descritiva

Os valores médios dos atributos da biomassa microbiana (BMS) e dos constituintes lábeis da MOS nos diferentes sistemas de uso e cobertura vegetal do solo estão apresentados na Tabela 1. As áreas de pastagens apresentaram o maior acúmulo de carbono da biomassa microbiana do solo, com 384 mg C kg^{-1} solo, cerca de 35 % acima dos valores observados nos remanescentes florestais da Mata Atlântica, o que foi atribuído ao intenso desenvolvimento e ciclagem do sistema radicular das gramíneas forrageiras na camada superior do solo, região que ocorre maior concentração de microrganismos. CARNEIRO et al. (2008) verificaram um aumento de 50% no valor de BMS-C em área de pastagem em relação ao cerrado nativo, o que foi atribuído ao sistema radicular fasciculado da gramínea, que se concentra nos primeiros 10 cm de profundidade e resulta em maior entrada de carbono no solo, via rizosfera e renovação do sistema radicular que atuam na ativação da microbiota do solo. O quociente microbiano (CM:CO) indica que cerca de 2 % do total de Corg está estocado na BMS dos solos de pastagens, representando o ambiente mais favorável ao acúmulo de BMS-C (Tabela 1).

Maior atividade respiratória da BMS também foi observada na pastagem, seguida em ordem decrescente pela lavoura, o remanescente florestal e a área degradada (Tabela 1). Apesar disso, o baixo valor de $q\text{CO}_2$ foi observado na pastagem, o qual é um indicativo de um sistema eficiente na utilização de carbono pela BMS e que estas áreas de pastagens não estão degradadas. Vários estudos confirmam a maior atividade microbiana em ambientes de pastagem (XAVIER et al., 2006; ARAÚJO et al., 2007; CARNEIRO et al., 2008; CARDOSO et al., 2009).

Apesar do contínuo aporte de material orgânico na área de lavoura, a introdução de práticas agrícolas afetou consideravelmente os teores de BMS-C, apresentando diminuição média de 30% em relação ao remanescente florestal. O sistema de manejo adotado tem sido intensivo, promovendo maiores perdas de C pela BMS (alto $q\text{CO}_2$) e FLL da MOS (Tabela 1). As práticas agrícolas de aração e gradagem frequentemente usadas no sistema de produção, com constante quebra dos agregados do solo e exposição às altas temperaturas, promovem um ambiente menos eficiente no uso de carbono pela BMS e no acúmulo de FLL da MOS. SKJEMSTAD & DALAL, (1987) verificaram o acúmulo de fração leve em solos continuamente vegetados com elevado retorno da palhada, sendo exemplo deste comportamento os solos florestais e/ou os de pastagens permanentes.

Na área de lavoura, os menores valores de BMS-C, BMS-N, CM:CO e FLL foram encontrados no sistema de cultivo intensivo de hortaliças (CI), com uso freqüente das práticas agrícolas de aração e gradagem, indicando baixa eficiência de uso do C pela BMS (Tabela 2). CARTER (1986), também observou que o preparo do solo resulta numa diminuição do quociente microbiano (CM:CO). BAYER & MIELNICZUK (2008), afirmam que o conteúdo da matéria orgânica do solo, sob vegetação natural, encontra-se estável, e o uso agrícola altera esse conteúdo, ocorrendo normalmente redução acentuada, quando utilizados métodos de preparo com intenso revolvimento do solo e sistemas com baixa adição de resíduos vegetais.

Isto demonstra como a influência do sistema de preparo do solo altera o compartimento biológico e lábil da MOS, alertando para a procura de sistemas agrícolas que expõem menos o solo e com práticas agrícolas menos intensivas, mantendo por um período mais longo a cobertura do solo.

A área degradada, devido à baixa disponibilidade de substrato (baixo teor de Corg) para uso pela BMS, limitou a sua atividade respiratória e, conseqüentemente promoveu baixo índice $q\text{CO}_2$ (Tabela 1). CATTELAN & VIDOR (1990), observaram os menores valores de

BMS em solo descoberto, sendo que nestes, como não ocorria cobertura vegetal, predispôs o solo a variações térmicas e hídricas e limitou a disponibilidade de resíduos orgânicos. Segundo BROOKES (1995), a resposta da respiração do solo é dependente, principalmente, da disponibilidade do substrato, umidade e temperatura.

A fração FLL mostrou-se ser mais sensível do que a fração leve intra-agregado da MOS (FLI) na distinção dos diferentes sistemas de uso e cobertura vegetal do solo, podendo a FLL indicar alterações nos agroecossistemas sob impactos agrícolas. A FLL é mais dinâmica no solo, devido à ausência de proteção física e interações químicas que culminam na formação de compostos organo-minerais (estáveis) no solo (CHRISTENSEN, 2000); PINHEIRO et al., 2004; ROSCOE & MACHADO, 2002).

Com relação aos atributos químicos do solo, as áreas de lavouras apresentaram maior valor de pH, menor teor de Al trocável e maiores teores de Ca, P e K devido ao manejo com adubação orgânica (Tabela 3).

Na Tabela 4 são apresentados os coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre os atributos estudados. A maioria dos atributos de BMS e constituintes lábeis da MOS apresentaram correlação positiva entre si, com exceção do qCO_2 e da FLI, indicando que quanto maior os valores de qCO_2 menor a eficiência de utilização do carbono pela BMS, e que neste estudo, a FLI não teve influência nos atributos de BMS e constituintes lábeis da MOS.

Tabela 1: Atributos de BMS e fração leve da MOS dos diferentes sistemas de uso e cobertura vegetal do solo, Seropédica - RJ.

Ambiente	BMSC	BMSN	Clab	Nlab	CNmic	CM:CO	NM:NT	RBS	qCO2	FLL	FLI	Ug
	..... mg C kg ⁻¹ solo .....				..... % .....			mgC-CO ₂ kg ⁻¹ solo h ⁻¹	mg C-CO ₂ g ⁻¹ BM h ⁻¹	..... g g ⁻¹		%
PAS	384 (±19)	45 (±4)	984 (±55)	174 (±13)	9 (±0,9)	2,1 (±0,2)	6 (±0,6)	1,1 (±0,1)	3 (±0,2)	0,08 (±0,07)	0,011 (±0,002)	14 (±0,9)
LAV	167 (±14)	34 (±4)	680 (±32)	160 (±8)	6 (±1)	0,8 (±0,1)	5 (±0,7)	0,9 (±0,1)	6 (±0,8)	0,03 (±0)	0,011 (±0,002)	12 (±0,5)
RMA	240 (±13)	26 (±2)	1417 (±60)	273 (±11)	10 (±1)	1,1 (±0,1)	3 (±0,3)	0,4 (±0)	2 (±0,2)	0,08 (±0,01)	0,014 (±0,002)	9 (±0,5)
ADR	83 (±17)	11 (±3)	294 (±73)	31 (±7)	7 (±2)	1,1 (±0,2)	2,2 (±0,5)	0,1 (±0)	2 (±0,5)	0,01 (±0)	0,013 (±0,002)	16 (±0,7)

Valor entre parênteses corresponde ao erro padrão da média. PAS: média de 9 repetições de três pastagens; LAV: média de 9 repetições de três lavouras sob manejo orgânico de produção; RMA: média de 9 repetições de três remanescentes florestais da Mata Atlântica; ADR: média de 9 repetições de três áreas degradadas. Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (BMSC, BMSN); carbono e nitrogênio lábil (Clab, Nlab); relação BMSC/BMSN (CNmic); relação BMSC/Corg (CM:CO); relação BMSN/Ntot (NM:NT); respiração microbiana (RBS); quociente metabólico (qCO₂); fração leve livre e intra-agregado (FLL, FLI); umidade gravimétrica (Ug).

Tabela 2: Atributos de BMS e fração leve da MOS dos diferentes sistemas de manejo fitotécnico do solo, Seropédica - RJ.

Cultivo	BMSC	BMSN	Clab	Nlab	CNmic	CM:CO	NM:NT	RBS	qCO2	FLL	FLI	Ug
Agrícola	..... mg C kg ⁻¹ solo .....				..... % .....			mgC-CO ₂ kg ⁻¹ solo h ⁻¹	mg C-CO ₂ g ⁻¹ BM h ⁻¹	..... g g ⁻¹		%
CI	121 (±6)	19 (±7)	617 (±25)	142 (±6)	9 (±3)	0,6 (±0)	3 (±1)	0,9 (±0,2)	6,9 (±2)	0,02 (±0)	0,008 (±0,002)	13 (±1)
CM	180 (±9)	42 (±0,5)	743 (±59)	169 (±17)	4 (±0,2)	0,9 (±0)	6 (±0,5)	1,2 (±0,1)	6,7 (±0,7)	0,04 (±0)	0,014 (±0,006)	11 (±1)
PD	199 (±26)	40 (±3,6)	682 (±64)	171 (±11)	5 (±1)	1,0 (±0,1)	5 (±0,7)	0,7 (±0,2)	3,5 (±0,5)	0,04 (±0)	0,011 (±0,002)	12 (±0,2)

Valor fora do parênteses representa a média de 3 repetições. Valor entre parênteses corresponde ao erro padrão da média. CI: cultivo intensivo sob manejo orgânico de produção; CM: cultivo mínimo sob manejo orgânico de produção; PD: cultivo rotacionado sob manejo orgânico de produção.

Tabela 3: Atributos químicos e granulometria do solo dos diferentes sistemas de uso e cobertura vegetal, Seropédica - RJ.

Ambiente	Corg	Ntot	C/N	pH água	Al	Ca	Mg	P	K	CTC	Areia	Silte	Argila
	..... g kg ⁻¹			1:2,5	..... cmol _c dm ⁻³ .....			..... mg L ⁻¹		cmol _c dm ⁻³%		
PAS	19 (±0,1)	0,8 (±0,1)	27 (±3,5)	5,2 (±0,1)	0,3 (±0,1)	2,2 (±0,2)	1,7 (±0,2)	5,6 (±2)	88,6 (±10)	8,5 (±0,3)	56,9 (±4)	18,9 (±3)	24,3 (±2)
LAV	20 (±0,1)	0,7 (±0)	30 (±1,5)	6,2 (±0,1)	0 (±0)	4,1 (±0,2)	2,0 (±0,1)	248,7 (±36)	178,3 (±13)	8,7 (±0,4)	70,1 (±3)	7,2 (±1)	22,6 (±2)
RMA	22 (±0,1)	0,9 (±0)	25 (±0,7)	4,4 (±0,2)	1,5 (±0,4)	2,6 (±0,3)	1,3 (±0,2)	10,9 (±2)	125,4 (±4)	11,3 (±0,5)	60,8 (±1)	11,4 (±2)	27,8 (±2)
ADR	7 (±0,2)	0,5 (±0,1)	15 (±2)	4,5 (±0,2)	1,4 (±0,3)	1,4 (±0,2)	0,6 (±0,1)	2,0 (±0,4)	36,0 (±6)	6,9 (±0,4)	35,7 (±2)	9,8 (±1)	54,0 (±2)

Valor entre parênteses corresponde ao erro padrão da média. PAS: média de 9 repetições de três pastagens; LAV: média de 9 repetições de três lavouras sob manejo orgânico de produção; RMA: média de 9 repetições de três remanescentes florestais da Mata Atlântica; ADR: média de 9 repetições de três áreas degradadas.

Tabela 4: Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre os atributos do solo, Seropédica - RJ.

	BMSC	BMSN	Clab	Nlab	CNmic	CM:CO	NM:NT	RBS	qCO2	FLL	FLI	Ug	pH	Al	Corg	Ntot	CN	Ca	Mg	P	K	CTC	Areia	Silte	Argila	
BMSC	1,0																									
BMSN	0,7	1,0																								
Clab	0,7	0,4	1,0																							
Nlab	0,5	0,5	0,9	1,0																						
CNmic	0,3	-0,2	0,4	0,2	1,0																					
CM:CO	0,7	0,5	0,2	0,1	0,3	1,0																				
NM:NT	0,6	0,9	0,2	0,2	-0,3	0,4	1,0																			
RBS	0,6	0,8	0,2	0,3	-0,1	0,4	0,7	1,0																		
qCO2	-0,1	0,3	-0,2	0,0	-0,3	-0,2	0,3	0,7	1,0																	
FLL	0,8	0,5	0,8	0,8	0,3	0,4	0,3	0,3	-0,2	1,0																
FLI	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	0,1	1,0															
Ug	-0,2	-0,1	-0,6	-0,7	-0,2	0,2	0,0	-0,1	-0,1	-0,4	-0,2	1,0														
pH	0,0	0,3	-0,2	0,0	-0,3	-0,1	0,4	0,6	0,8	-0,2	-0,2	-0,1	1,0													
Al	-0,1	-0,3	0,2	-0,1	0,4	0,0	-0,4	-0,6	-0,5	0,1	0,1	0,0	-0,8	1,0												
Corg	0,6	0,5	0,8	0,8	0,3	0,0	0,4	0,5	0,2	0,7	0,0	-0,7	0,2	-0,1	1,0											
Ntot	0,6	0,5	0,8	0,8	0,3	0,4	0,1	0,3	-0,1	0,6	0,0	-0,5	-0,1	0,1	0,6	1,0										
CN	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	-0,1	0,6	0,6	0,5	0,4	-0,1	-0,5	0,4	-0,2	0,8	0,1	1,0									
Ca	-0,1	0,2	0,1	0,3	-0,1	-0,3	0,1	0,4	0,7	-0,1	-0,2	-0,4	0,8	-0,6	0,4	0,1	0,4	1,0								
Mg	0,3	0,5	0,3	0,4	-0,2	0,0	0,4	0,7	0,5	0,2	-0,1	-0,3	0,7	-0,6	0,5	0,3	0,4	0,7	1,0							
P	-0,2	0,2	-0,2	0,0	-0,3	-0,3	0,3	0,5	0,8	-0,3	-0,1	-0,2	0,8	-0,4	0,2	-0,1	0,4	0,7	0,5	1,0						
K	0,1	0,4	0,3	0,5	-0,1	-0,1	0,3	0,4	0,4	0,2	-0,1	-0,5	0,5	-0,4	0,5	0,5	0,3	0,7	0,6	0,5	1,0					
CTC	0,3	0,2	0,8	0,8	0,4	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,5	-0,1	-0,6	-0,2	0,3	0,6	0,7	0,3	0,3	0,3	-0,1	0,4	1,0				
Areia	0,3	0,5	0,4	0,6	0,0	-0,2	0,5	0,5	0,5	0,4	-0,1	-0,6	0,5	-0,3	0,8	0,3	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	1,0			
Silte	0,5	0,4	0,2	0,2	0,1	0,6	0,1	0,2	-0,2	0,4	0,0	0,1	-0,1	-0,2	0,0	0,4	-0,1	-0,2	0,1	-0,4	-0,1	0,1	-0,3	1,0		
Argila	-0,6	-0,7	-0,6	-0,7	0,0	-0,1	-0,6	-0,7	-0,4	-0,6	0,1	0,6	-0,5	0,4	-0,8	-0,5	-0,7	-0,6	-0,7	-0,4	-0,6	-0,4	-0,9	-0,2	1,0	

Valores em negrito são significativos ao nível de 5% de significância. Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (BMSC, BMSN); carbono e nitrogênio lábil (Clab, Nlab); relação BMSC/BMSN (CNmic); relação BMSC/Corg (CM:CO); relação BMSN/Ntot (NM:NT); respiração microbiana (RBS); quociente metabólico (qCO₂); fração leve livre e intra-agregado (FLL, FLI).

4.3.2 Análise de Componentes Principais (ACP)

Na Tabela 5 são apresentados os valores de variância, a contribuição da variável e do ambiente em cada componente principal. A ACP permitiu resumir o conjunto das 25 variáveis originais em 3 componentes principais. Os dois primeiros componentes principais explicaram 81 % da variância total dos dados. Deste percentual, o componente principal 1 (F1) explicou 53 % da variabilidade do conjunto dos dados. As variáveis com maior capacidade discriminatória no processo de formação dos agrupamentos pelo componente principal 1 (F1), foram o teor de argila (7,6 %) e a relação C/N (7,5 %). No componente principal 2 (F2), foram a relação C/Nmic (12,7 %), o qCO₂ (9,2 %) e o P (9 %), mostrando a importância do uso da BMS e dos atributos químicos e granulométricos do solo na distinção de diferentes sistemas de manejo fitotécnico e cobertura vegetal do solo, ampliando a possibilidade de prognóstico sobre o destino do carbono orgânico do solo.

A área degradada (ADR) foi o ambiente que mais contribuiu para o componente principal 1 (F1) identificar os padrões de agrupamento do conjunto de dados (Tabela 5), mostrando-se a área mais discrepante com relação as variáveis estudadas.

Tabela 5: Autovalor, variância, contribuição da variável e contribuição do ambiente dos quatros componentes principais, Seropédica - RJ.

	F1	F2	F3
Autovalor	13,1	7,2	4,6
Variância (%)	52,5	28,9	18,6
Variância acumulada (%)	52,5	81,4	100,0
Contribuição da variável (%)	F1	F2	F3
BMSC	3,6	3,2	6,3
BMSN	6,0	0,0	4,4
Clab	3,0	7,4	1,4
Nlab	4,2	4,3	2,8
CNmic	0,6	12,7	0,1
CM:CO	0,6	2,4	16,0
NM:NT	4,8	0,8	6,6
RBS	5,5	0,9	4,6
qCO2	2,5	9,2	0,2
FLL	3,2	7,7	0,5
FLI	2,1	4,8	8,1
Ug	3,3	1,8	9,6
pH	2,9	8,5	0,1
Al	3,8	4,9	3,1
Corg	6,6	1,2	1,1
Ntot	4,4	5,3	0,8
CN	7,5	0,2	0,0
Ca	4,2	3,5	4,3
Mg	7,1	1,0	0,0
P	1,7	9,0	2,8
K	5,0	1,3	5,3
CTC	2,4	5,3	6,4
Areia	6,7	0,3	2,1
Silte	0,5	4,3	13,4
Argila	7,6	0,0	0,0
Contribuição do ambiente (%)	F1	F2	F3
PAS	10,9	4,5	59,6
LAV	15,6	50,7	8,8
RMA	1,5	42,5	31,0
ADR	72,0	2,3	0,7

PAS: pastagem; LAV: lavoura sob manejo orgânico de produção; RMA: remanescente florestal da Mata Atlântica; ADR: área degradada. BMS-C, BMS-N: carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo; Clab: carbono lábil; Nlab: nitrogênio lábil; CNmic: relação BMS-C/BMS-N; CM:CO: relação BMS-C/Corg; NM:NT: relação BMS-N/Ntot; RBS: respiração da BMS; qCO2: quociente metabólico; FLL: fração leve-livre da MOS; FLI: fração leve intra-agregado da MOS; Ug: umidade gravimétrica; pH em água; Al: alumínio; Corg: carbono orgânico; Ntot: nitrogênio total; CN: relação Corg/Ntot..

A Figura 3 representa graficamente a análise de componentes principais (ACP) em duas dimensões, representada pelo eixo F1 (componente principal 1) e o eixo F2 (componente principal 2). A distribuição espacial das 25 variáveis originais (atributos de BMS, químicos e granulométricos do solo) está representada por setas e a dos ambientes (pastagem, lavoura, remanescente florestal e área degradada) por pontos.

A ACP separou os diferentes ambientes em três grupos em função da similaridade das variáveis estudadas (Figura 3). O primeiro grupo compreende aos remanescentes florestais (RMA) e as pastagens (PAS), o segundo as lavouras (LAV) e o terceiro as áreas degradadas (ADR). As pastagens e os remanescentes florestais são áreas que apresentam elevado retorno de biomassa vegetal, através de detritos de folhas e raízes, e o não revolvimento do solo e a qualidade nutricional da matéria orgânica, são características em comum destas áreas.

O componente F1 mostrou que as lavouras se associaram a altos valores de pH, P e qCO_2 , discriminando-as das pastagens e dos remanescentes florestais pelo maior teor de Corg, Ntot e constituintes lábeis da MOS (BMS-C, FLL, Csol e Nsol). O manejo de adubação orgânica promoveu os altos valores de pH e P da LAV, e o qCO_2 alto é indicativo de que as práticas agrícolas de aração e gradagem promoveram baixa eficiência metabólica da BMS.

Pelo componente F2, a área degradada apresentou alta correlação com os valores de argila e baixa com os valores de Corg e atributos de biomassa microbiana do solo (Figura 3). O alto percentual de argila na ADR caracteriza a presença do horizonte B, podendo-se inferir que houve perda dos horizontes superficiais, acarretando em menor quantidade de Corg e FLL da MOS, o que afetou negativamente os teores de BMS-C e BMS-N.

Além disso, a Figura 3 mostra a importância do teor de argila no pool reservatório da matéria orgânica fisicamente estabilizada, pois, mesmo este sistema com solo exposto e baixa entrada de FLL, o mesmo conseguiu manter o teor de FLI em níveis equiparáveis ao FMA. Isto ocorre devido à maior estabilização e efetiva proteção da matéria orgânica contra o ataque microbiano em comparação à fração leve associada à areia (HASSINK, 1995).

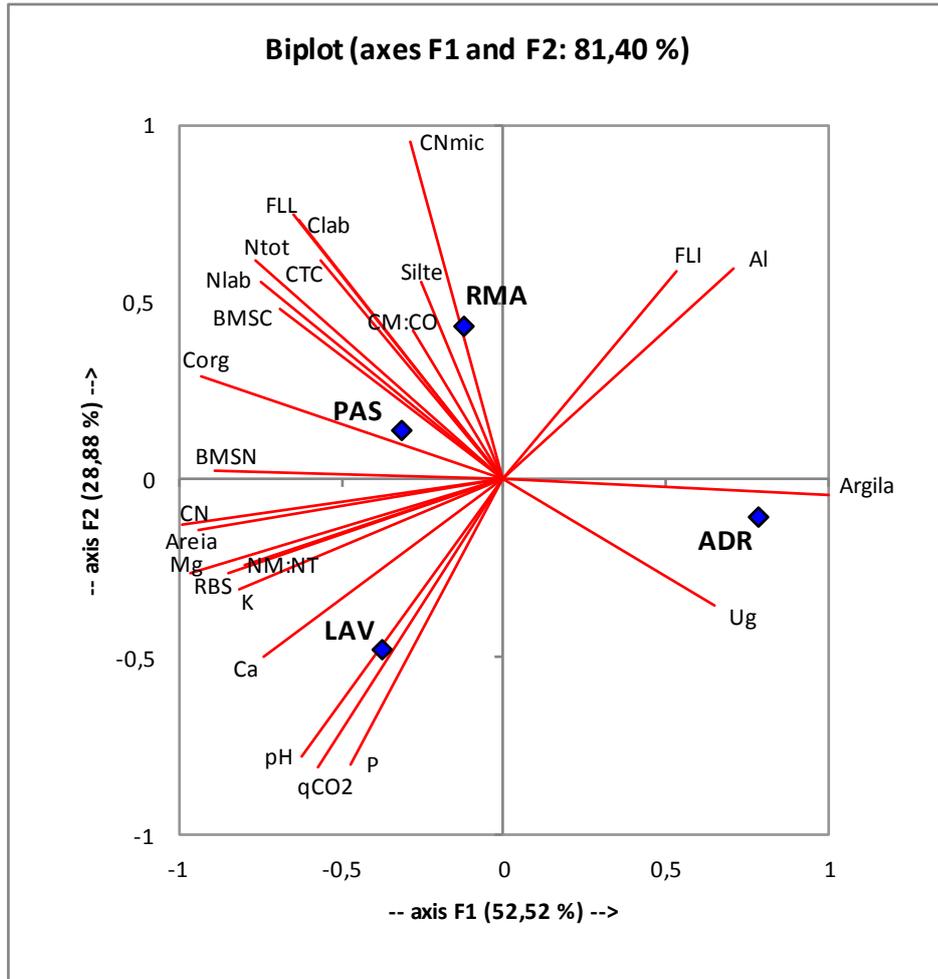


Figura 3: Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos de BMS e frações mais lábeis da MOS, físicos e químicos do solo nos diferentes sistemas de manejo fitotécnico e cobertura vegetal, Seropédica - RJ.

*/ PAS: pastagem; RMA: remanescente florestal da Mata Atlântica; LAV: lavoura sob manejo orgânico de produção; ADR: área degradada. Carbono orgânico (Corg); nitrogênio total (Ntot); relação C/N; Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (BMSC; BMSN); relação BMSC/BMSN (CNmic); relação BMSC/Corg (CM:CO); relação BMSN/Ntot (NM:NT); C-lábil (Clab); N-lábil (Nlab); respiração da BMS (RBS); quociente metabólico (qCO₂); fração leve livre da MO (FLL); fração leve intra-agregado (FLI); Ug: umidade gravimétrica.

4.4 CONCLUSÕES

Os diferentes sistemas de manejo fitotécnico e a cobertura vegetal do solo afetam o teor de carbono da biomassa microbiana e frações lábeis da matéria orgânica, com maiores perdas de C do solo nas áreas manejadas com culturas agrícolas e nas áreas degradadas quando comparadas com as pastagens e as florestas. Dentre os diferentes sistemas de manejo fitotécnico, maiores perdas de carbono foram observados nas áreas agrícolas com culturas de ciclo curto e com uso intensivo das práticas de aração e gradagem, alertando para a procura de sistemas de manejo que minimizem o revolvimento do solo e priorizem a manutenção da cobertura vegetal para que possa aumentar o estoque de C orgânico nestes solos.

5 CAPÍTULO II

BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO EM ÁREAS COM DIFERENTES GRAUS DE ANTROPIZAÇÃO NA AMAZÔNIA

RESUMO

Alguns sistemas de uso da terra nos diferentes biomas do Brasil podem alterar consideravelmente os estoques de C e, conseqüentemente, a atividade microbiana do solo, repercutindo na maior emissão ou mitigação de gases de efeito estufa. Foram realizados estudos na província petrolífera Base de Operações Geólogo Pedro de Moura (BOGM) para avaliar a biomassa microbiana do solo (BMS) em áreas com diferentes graus de antropização e em uma toposequência sob floresta natural na Amazônia, durante as estações chuvosa (dezembro, 2010) e seca (julho, 2011). Para tal foram selecionadas as seguintes áreas com diferentes graus de antropização: área de clareira reflorestada (ACR) e área de empréstimo de solo (AES). Além destas, uma toposequência sob vegetação natural da Amazônia (Floresta Tropical Equatorial) foi selecionada para avaliar a influência do relevo local e da classe de solo na BMS. A toposequência foi formada pelo perfil 35 (P35) localizado no topo de paisagem classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico; o perfil 55 (P55) localizado no terço médio de paisagem classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico; e o perfil 56 (P56) localizado no terço inferior de encosta classificado como GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico. Em todas as áreas realizaram-se amostragens de solo na camada de 0-10 cm de profundidade nas épocas chuvosa e seca para verificar o efeito da umidade na dinâmica da BMS. Em cada área foram coletadas três repetições e determinou-se os teores de C e N associados à BMS, C e N solúveis em K_2SO_4 , respiração microbiana (RBS), quociente microbiano (CM:CO) e quociente metabólico (qCO_2). Também foram determinadas as frações granulométricas areia, silte, argila, umidade gravimétrica, bem como os atributos químicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , P_2O_5 , K^+ , C orgânico, Al^{3+} , CTC e pH em água). Os valores de BMS-C variaram de 19 a 351 mg C kg^{-1} solo, com o máximo observado no P35 e o mínimo na área com maior grau de antropização (AES). Em ambas as épocas de amostragens a área de floresta primária localizada no topo da paisagem (P35) com relevo plano promoveu o maior teor de BMS-C, com cerca de 2 a 3 % do Corg total estocado na estrutura celular dos microrganismos. Diferença nos teores de BMS-C só foi constatada nos tipos de solos mais contrastantes, entre o GLEISSOLO e o CAMBISSOLO. Baixos teores de BMS-C foram observados no terço inferior de encosta (P56), por ser um solo com constante saturação de água, além de apresentar textura mais arenosa e menor CTC. O relevo local do perfil 55, classificado como ondulado a forte ondulado, favorece o escoamento superficial da água e a erosão do solo, influenciando negativamente o teor de BMS-C na época seca com perda relativa de 79 % do C acumulado na BMS durante a época chuvosa. É de conhecimento comum que a topografia afeta significativamente a distribuição espacial da umidade, temperatura e matéria orgânica do solo. A análise de componentes principais separou nitidamente os diferentes ambientes em função da época de amostragem, com maiores valores de BMS-C, RBS e CM:CO no período das chuvas, indicando uma BMS mais ativa e eficiente na imobilização de C. Comportamento inverso foi observado com o BMS-N, o qual apresentou os maiores valores na época seca, repercutindo na baixa relação CN microbiana nesta época. O qCO_2 apresentou maiores perdas de carbono do solo na área de maior grau de antropização (AES), indicando que os atributos de BMS foram sensíveis para a inferência sobre a interpretação atual do estado de uso de substrato pela BMS e eventual prognóstico sobre o destino da conservação da MOS. O impacto negativo gerado pelas atividades de exploração de gás e petróleo nas áreas com diferentes graus de antropização promove baixa eficiência metabólica da BMS mesmo após oito anos de reflorestamento da área de clareira, porém mostra tendência de recuperação nos teores de Corg e BMS-C em relação a área de empréstimo de solo.

Palavras chave: Matéria orgânica do solo, quociente metabólico e respiração microbiana.

ABSTRACT

Some systems of land use in different biomes of Brazil may significantly alter C stocks and consequently the soil microbial activity, resulting in higher emissions or mitigation of greenhouse gases. Studies were conducted on oil province Operating Base Pedro de Moura (BOGM) to assess the soil microbial biomass (SMB) in areas with different levels of anthropization and in a toposequence under natural forest in the Amazon during the rainy and dry seasons. We selected the following areas with different levels of anthropization: reforested area (ACR) and loan area soil (AES). In addition, a soil toposequence with natural Amazonian vegetation (Equatorial Tropical Rainforest) was selected to evaluate the influence of the topography and soil type on SMB. The toposequence was formed by the profile 35 (P35) located on the top of the slope classified as Aluic CAMBISOL, the profile 55 (P55) located in the middle third of the slope classified as Dystrophic CAMBISOL Tb, and profile 56 (P56) located in the lower third of the slope classified as Haplic GLEYSOL Ta. Soil samples at 0-10 cm depth were taken in all areas in the rainy and dry seasons to determine the effect of humidity on the dynamics of SMB. In each area three replicates were collected and determined the levels of C and N associated with the SMB, C and N soluble K_2SO_4 , microbial respiration (RBS), microbial quotient (CM:CO) and metabolic quotient (qCO_2). It was also determined the fractions sand, silt, clay, gravimetric moisture content, as well as the chemical attributes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , P_2O_5 , K^+ , organic C, Al^{3+} , CEC and pH in water). The SMB values ranged from 19 to 351 mg C kg^{-1} soil, with maximum observed in the P35 area and minimum in the area with the highest degree of anthropogenic activity (AES). In both sampling dates in the area of primary forest located at the top of the plain landscape (P35) gave the highest level of SMB, with about 2-3% of total organic C stored in the cell structure of microorganisms. Difference in levels of SMB among soil types was only found in more contrasting soils such as GLEYSOL and CAMBISOL. Low concentrations of SMB were observed in the lower third of the slope (P56), having a constant soil water saturation, sandy texture and low CEC. The relief around profile 55 was classified as rolling to hilly favoring runoff and soil erosion, negatively influencing the content of SMB in the dry season with a loss on 79% of C accumulated in the SMB during the rainy time. It is common knowledge that the topography significantly affects the spatial distribution of moisture, temperature and soil organic matter. The principal component analysis clearly separated the different environments depending on the time of sampling, with higher values of SMB-C, RBS and CM:CO during the rainy season, indicating a more active SMB and efficient immobilization of C. An opposite behavior was observed with SMB-N, which showed the highest values in the dry season, resulting in low microbial CN ratio at this time. The qCO_2 showed greater losses of soil carbon in the area of highest degree of anthropogenic activity (AES), indicating that the attributes of SMB were sensitive to inference about the interpretation of the current state of the substrate used by SMB and possible prognosis on the fate of conservation of SOM. The negative impact generated by the activities of oil and gas exploration in areas with different levels of human activity promotes low metabolic efficiency of SMB even after eight years of reforestation of the clearing area, but shows signs of recovery in the levels of organic C and SMB-C in respect of loan area soil.

Keywords: Soil organic matter, microbial respiration and metabolic quotient.

5.1 INTRODUÇÃO

O bioma Amazônia ocupa uma área no território brasileiro de aproximadamente 4.196.943 km², o equivalente a 49 % da área do país, sendo que deste território 9 % corresponde a área antropizada, ou seja, áreas utilizadas principalmente para a agricultura e pecuária, mas também para urbanização, florestas exóticas, mineração e exploração de gás e petróleo (SANTOS et al., 2007).

Estimativas indicam que a taxa de desmatamento na Amazônia Brasileira é de 1,1 a 2,9 Mha ano⁻¹ (CERRI et al., 2007b). Em 2004, o Brasil atingiu valores muito altos de desmatamento na Amazônia, chegando a 27.000 km² (Fonte: INPE/DETER (disponível em <http://www.inpe.br/noticias>). Entretanto, a partir de 2005 é verificada uma tendência de redução na taxa anual do desmatamento na Amazônia. Entre 2004 e 2005 a redução foi de 31% (INPE/PRODES), entre 2005 e 2006 de 25% (INPE/PRODES) e a estimativa de 2006 a 2007 foi de 30% de redução (INPE/DETER). A partir de julho de 2007, contudo, algumas alterações parecem estar ocorrendo e podem vir a afetar a tendência anterior de redução do desmatamento. Apesar dessa elevada taxa de desmatamento, a Amazônia Brasileira, possui ainda aproximadamente 40 % da área remanescente de floresta tropical no mundo (LAURANCE et al., 2001).

A situação fica complicada quando se considera que nos ambientes tropicais há predominância de solos altamente intemperizados, e que 75 % dos solos da Bacia Amazônia são de baixa fertilidade (SANCHEZ et al., 1982), onde a MOS tem papel fundamental na sua fertilidade. Com o desmatamento há declínio no teor de MOS, o que consiste num problema para qualquer tipo de cultivo, principalmente quando se considera a escassez de infraestrutura da região no que se refere à disponibilidade de insumos agrícolas.

Com isso, a produtividade dos ecossistemas tropicais depende, em grande parte, do processo de transformação da MOS e, por conseguinte, da BMS (GAMA-RODRIGUES, 1999; MOREIRA & MALAVOLTA, 2004). A BMS é considerada um compartimento não protegido da MOS, com tempo de ciclagem médio, em solos de regiões tropicais, de três meses (DUXBURY et al., 1989). Esta representa a parte viva da MOS e contém, em média, de 2 a 5% do carbono e até 5% do nitrogênio total nos solos tropicais (SMITH & PAUL, 1990), e esta variação depende do tipo de solo (RUIVO et al., 2002; GONÇALVES et al., 2007), devido principalmente a granulometria, com maiores valores de BMS em solos com maior teor de argila (PFENNING et al., 1992; ARAÚJO, 2003), do uso e cobertura vegetal (LOUREIRO et al., 2010), do relevo da paisagem (FLORINSKY et al., 2004) e da precipitação pluviométrica e temperatura (CATTELAN & VIDOR, 1990).

Segundo BERNOUX & VOLKOFF (2006), o estoque de carbono para o Brasil (8,5 milhões de km²) na camada de 0 a 30 cm de solo, região que ocorre maior concentração de microrganismos, é de 39 Pg de C (Pg = Petagrama = 10¹⁵ g). Já que 2 a 5 % do C total do solo estão estocados na BMS (SMITH & PAUL, 1990), o potencial de estoque de carbono na BMS para o Brasil seria na ordem de 0,8 a 1,95 Pg, demonstrando a magnitude que o compartimento BMS representa para o seqüestro de C no solo. Só a floresta amazônica no Brasil teria um potencial de seqüestrar C da ordem de 421 a 470 Tg ano⁻¹ (Tg = Teragrama = 10¹² g) desse total, cerca de 30 % (126 a 141 Tg ano⁻¹ de C) seria acumulado pelo solo, e os 70 % restantes (295 a 329 Tg ano⁻¹ de C), na biomassa aérea (CERRI et al., 2006b). Porém, este estoque de C está ameaçado pelo avanço das áreas antropizadas.

Considerando o exposto acima, estudos foram realizados na província petrolífera Base de Operações Geólogo Pedro de Moura (BOGM) para avaliar a biomassa microbiana do solo (BMS) em áreas com diferentes graus de antropização e em uma topossequência sob floresta natural na Amazônia, durante as estações chuvosa e seca.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Local de estudo

O estudo da biomassa microbiana e sua relação com o grau de antropização do solo foi realizado próximo ao município de Coari, Amazonas, as margens do rio Urucu, na província petrolífera Base de Operações Geólogo Pedro de Moura (BOGPM; Figura 4). A BOGPM representa um pólo industrial de exploração de petróleo e gás natural pertencente à Petrobrás.

5.2.2 Clima

O clima desta região é tropical úmido, tipo Afi pela classificação de Köppen, apresentando chuvas relativamente abundantes durante todo o ano (média de 2250 mm ano⁻¹), sendo que a precipitação no mês em que menos chove é sempre superior a 60 mm. A temperatura média anual da região é de aproximadamente 26°C (VIEIRA & SANTOS, 1987).

5.2.3 Amostragem e caracterização das áreas

Foram selecionadas áreas com diferentes graus de antropização do solo, sendo elas: área de clareira reflorestada e área de empréstimo de solo (Figura 5). Abaixo, segue a descrição detalhada das áreas:

1) **Área de empréstimo de solo (AES):** é caracterizada pelo desmatamento com retirada de grandes quantidades de terra para construção de estradas, que propiciam manutenção aos gasodutos e infra-estrutura na realização dos trabalhos de prospecção e produção de gás natural e de petróleo. Nestes locais, após a retirada da vegetação e do solo superficial (topsoil), a empresa realiza o reflorestamento com espécies nativas da região.

2) **Área de clareira reflorestada (ACR):** foi implantada em 2001 (8 anos de idade) utilizando-se as seguintes espécies nativas da região: ingá (*Inga sp.*), goiaba-de-anta (*Bellucia dichotoma*), lacre (*Vismia guianensis*), samaúma (*Ceiba pentandra Gaertn*), buriti (*Mauritia vinifera*), açazeiro (*Euterpe oleracea*), andiroba (*Carapa guianensis*) e sombreiro (*Clitorea racemosa*).

Além destas, uma toposequência sob vegetação natural na Amazônia foi selecionada para avaliar a influência do relevo local e da classe de solo na dinâmica da BMS. A toposequência foi formada pelos seguintes perfis (Figura 6):

3) **Perfil 35 (P35):** localizado no topo da “terra firme” (Topo de elevação 1% declividade) classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.

4) **Perfil 55 (P55):** localizado no terço médio de paisagem (13% declividade) classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico.

5) **Perfil 56 (P56):** localizado no terço inferior de encosta suave (4% declividade próximo de baixada muito mal drenado) classificado como GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico.

Em cada sistema de uso e cobertura vegetal do solo, foram coletadas três amostras compostas, e cada amostra composta foi oriunda de seis subamostras, coletadas na profundidade de 0 a 10 cm, nas estações chuvosa (dezembro de 2009) e seca (agosto de 2010). Os pontos de coleta das amostras foram georreferenciados no sistema UTM, Datum SAD 69, Zona 20 S, com precisão sub métrica (DGPS – modelo Trimble-Pro XT). Após a coleta, as amostras foram secas ao ar, destorroadas, homogeneizadas e passadas por peneira de 2,0 mm de malha (terra fina seca ao ar - TFSA) para posterior execução das análises químicas, físicas e biológicas.

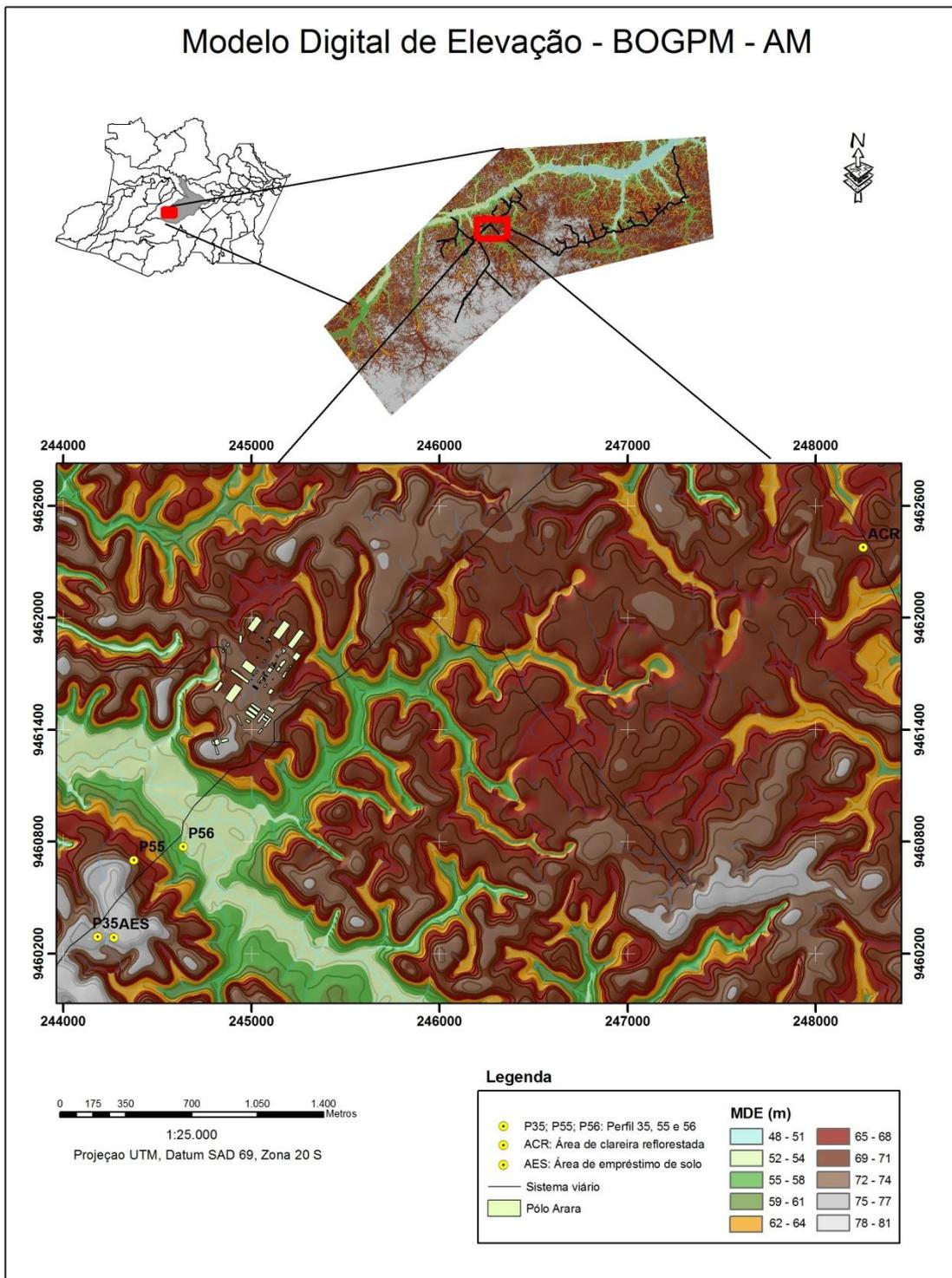


Figura 4: Base de Operações Geólogo Pedro de Moura (BOGPM), Coari – AM, 2010.

ACR



AES



Figura 5: Área de clareira reflorestada (ACR) e área de empréstimo de solo (AES) Coari - AM.

a)



b)



c)



Figura 6: Toposequência sob floresta natural (a: perfil P35 em topo de paisagem; b: perfil P55 no terço médio de paisagem; c: perfil P56 em terço inferior de encosta), Coari - AM.

5.2.4 Análises de solo

Em cada amostra determinou-se os teores de C e N associados à BMS, C e N solúveis em K_2SO_4 , respiração microbiana (RBS), quociente microbiano (CM:CO) e quociente metabólico (qCO_2). Determinaram-se também as frações granulométricas areia, silte, argila, umidade gravimétrica, bem como os atributos químicos cálcio, magnésio, fósforo, potássio, carbono orgânico, alumínio, CTC e pH em água.

5.2.5 Análise laboratorial

a) Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo (BMS-C, BMS-N)

A determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C) foi determinada por meio do método da fumigação-extração, proposto por VANCE et al. (1987). Os procedimentos em laboratório seguiram o protocolo descrito por DE-POLLI & GUERRA (1999) e SILVA et al. (2007b), com a relação solo extrator 1:2,5 segundo TATE et al. (1988) e $K_c=0,33$ preconizado por SPARLING & WEST (1988), realizando fumigação com adição de clorofórmio (isento de etanol) diretamente na amostra, como descrito por BROOKES et al. (1982) e WITT et al. (2000), mantendo-as em local escuro por 24 horas, procedendo-se a extração e quantificação do carbono microbiano pelo método (WALKLEY & BLACK, 1934) modificado segundo TEDESCO et al. (1995), sem aquecimento externo em chapa.

A determinação do nitrogênio da biomassa microbiana do solo (BMS-N) foi determinada por meio do método da fumigação-extração, proposto por VANCE et al. (1987). Os procedimentos em laboratório seguiram o protocolo descrito por SILVA et al. (2007a), com a relação solo extrator 1:2,5 segundo TATE et al. (1988) e $K_n = 0,54$ (BROOKES et al., 1985) realizando fumigação direta com adição de clorofórmio (isento de etanol) diretamente nas amostras (BROOKES et al., 1982; WITT et al., 2000), mantendo-as em local isento de luminosidade por 24 horas, procedendo-se, após extração, a quantificação do nitrogênio microbiano por destilação de arraste de vapor (Kjeldahl), seguida de volumetria de neutralização ácido-base empregando ácido sulfúrico como titulante (ALVES et al., 1994).

Através do carbono e do nitrogênio da biomassa microbiana foi calculada a relação C/N microbiana (CN_{mic}).

b) Quociente microbiano do solo (CM:CO)

A relação entre o carbono da biomassa microbiana do solo e o carbono orgânico total do solo (CM:CO), denominada quociente microbiano, foi calculado de acordo com SPARLING (1992).

c) Carbono e nitrogênio solúveis do solo (C_{sol}, N_{sol})

O carbono solúvel (C_{sol}) foi determinado através da extração com K₂S₀₄ 0,5M e relação solo-extrator 1:2,5 segundo TATE et al. (1988), procedendo-se a quantificação do carbono solúvel pelo método (WALKLEY & BLACK, 1934) modificado segundo TEDESCO et al. (1995).

O nitrogênio solúvel (N_{sol}) foi determinado através da extração com K₂S₀₄ 0,5M e relação solo-extrator 1:2,5 segundo TATE et al. (1988), procedendo-se a quantificação do nitrogênio solúvel por destilação de arraste de vapor (Kjeldahl), seguida de volumetria de neutralização ácido-base empregando ácido sulfúrico como titulante (ALVES et al., 1994).

d) Respiração microbiana e quociente metabólico do solo (RBS, qCO₂)

A atividade microbiana foi determinada mediante a quantificação da evolução de CO₂ por meio da metodologia proposta por JENKINSON & POWLSON (1976). Os procedimentos em laboratório seguiram o protocolo descrito por SILVA et al. (2007c).

O quociente metabólico (qCO₂) foi calculado pela razão entre o C-CO₂ da respiração microbiana e o C da biomassa microbiana (BMS-C) das amostras, conforme ANDERSON & DOMSCH (1993). A atividade microbiana (RBS) quando relacionada à biomassa microbiana

e ao tempo de incubação, denomina-se respiração específica ou quociente metabólico (índice qCO_2) (ANDERSON & DOMSCH, 1985, 1990). A combinação das medidas da biomassa microbiana e respiração do solo fornecem a quantidade de CO_2 evoluída por unidade de biomassa, denominada quociente metabólico (qCO_2).

e) Atributos químicos e granulométricos

A análise granulométrica e a quantificação do Corg, Ca, Mg, P, K e Al foi realizada com terra fina seca ao ar (TFSA), segundo EMBRAPA (1997). O nitrogênio total do solo foi determinado segundo BREMNER & MULVANEY (1982).

5.2.6 Análise estatística descritiva e multivariada

Inicialmente foi feita a análise estatística descritiva, bem como de correlação de Pearson, através do software XLSTAT 7.5 (ADINSOFT, 2004).

Realizou-se a análise multivariada de componentes principais (ACP) utilizando os programas XLSTAT 7.5 e CANOCO 4.5 (TER BRAAK & SMILAUER, 2002). As amostras (P35, P55, P56, ACR e AES) e as variáveis (BMS e atributos lábeis da MOS) foram transformadas em coordenadas que correspondem à sua projeção nos eixos de ordenação, ou autovetores, representando o peso de cada variável sobre cada componente (eixo) e funcionando como coeficiente de correlação.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Análise descritiva

Na Tabela 6 são apresentados os resultados de carbono da biomassa microbiana (BMS-C, BMS-N) e sua atividade respiratória (RBS) em áreas com diferentes graus de antropização (AES e ACR) e sob floresta natural (P35, P55 e P56) nas épocas chuvosa e seca.

Os valores médios de BMS-C e RBS variaram entre 0 a 351 mg C kg⁻¹ solo e 0,15 a 0,69 mgC-CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹, respectivamente, com os maiores valores observados na época chuvosa. A área de floresta natural localizada no topo da paisagem (P35) com relevo plano apresentou o maior teor de BMS-C em ambas as épocas de amostragens, com cerca de 2 a 3 % do total de Corg estocado na estrutura celular dos microrganismos. Diferença nos teores de BMS-C só foi constatada nos tipos de solos mais contrastantes, GLEISSOLO e CAMBISSOLO (Tabela 6).

A área de empréstimo de solo (AES) reduziu significativamente o conteúdo de Corg e BMS-C, e o reflorestamento com espécies nativas da região após 8 anos indicou recuperação do conteúdo destes atributos do solo (Tabela 6). A diminuição dos teores de BMS-C na AES deve-se, principalmente, a redução na quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo (MOS). SIQUEIRA & FRANCO (1988) afirmam que a retirada da floresta nativa e a remoção dos horizontes superficiais do solo provocam diminuição dos teores de BMS-C e da fertilidade do solo. DEMATTÊ (1988) diz que, após a remoção da floresta, o teor de MOS nos primeiros centímetros do solo decresce com o aumento da temperatura, as perdas por erosão, a maior atividade biológica, e principalmente com a redução da fonte supridora de resíduos orgânicos. O reflorestamento dessas áreas promove uma recuperação lenta e contínua da quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo (OLIVEIRA, 1991), corroborando com os resultados do presente trabalho.

O menor teor de BMS-C do perfil 56 deve-se, principalmente, ao fato de estar localizado no terço inferior de encosta, com constante saturação de água, restringindo o crescimento da maioria dos microrganismos aeróbios. Além disso, as características químicas e granulométricas do solo do P56, classificado como GLEISSOLO HÁPLICO Ta, com menor teor de argila e menor CTC (Tabela 7), desfavorecem o acúmulo de BMS-C. WANDER & TRAINA (1994), dizem que a BMS e a atividade microbiana em sistemas florestais são altamente correlacionadas com características químicas do solo, como potencial de Hidrogênio (pH), capacidade de troca catiônica (CTC) e nutrientes presentes na solução do solo. FRANCHINI et al. (2007) e SOUZA et al. (2008), dizem que além destas características, a biomassa microbiana varia em função do ciclo das culturas, da incorporação de resíduos vegetais, do regime pluviométrico, entre outros, de modo que um ou mais desses fatores podem estar associados às variações na biomassa microbiana entre duas avaliações.

Apesar da área de estudo não apresentar déficit hídrico na época seca, provavelmente, o declínio no teor de umidade do solo está influenciando o baixo teor de BMS-C do P55 (Tabela 6). Nota-se que este se encontra em área de encosta, com classe de declividade variando de relevo ondulado a forte ondulado e classe de erosão ligeira, com maior escoamento superficial e menor capacidade de infiltração de água no solo. Já o perfil 35 localizado no topo da paisagem com relevo plano, favorece o acúmulo e a infiltração de água no perfil do solo, repercutindo nos maiores valores de BMS-C em ambas as épocas (Tabela 6). Além disso, os horizontes superficiais do P35 apresentam maior quantidade de raízes, favorecendo a exsudação radicular e a BMS (tópico observações do Anexo I).

CATTELAN & VIDOR (1990), perceberam que sistemas que mantêm uma quantidade maior de água apresentam valores de biomassa microbiana maiores. Essa diferença comportamental pode estar ligada a uma série de fatores, principalmente abióticos

(chuva, temperatura e etc) e do relevo local da paisagem. Os estudos de FLORINSKY & KURYAKOVA (2000) e FLORINSKY et al. (2002) comprovam o controle topográfico na distribuição espacial da umidade, temperatura e matéria orgânica do solo. FLORINSKY et al., (2004) apontam que modelos digitais de terreno podem ser utilizados para analisar, modelar e prever a distribuição espacial das propriedades microbianas do solo.

Os teores de BMS-N foram maiores na época seca, apresentando comportamento inverso ao do BMS-C. A variação sazonal nos teores de BMS-C e BMS-N repercutiu na maior relação C/N microbiana (CN_{mic}) na época das chuvas (Tabela 6), indicando que o aumento da precipitação pluviométrica promove o maior acúmulo de BMS-C. O estudo de GAMA-RODRIGUES et al., (2005) confirma o maior teor de BMS-C com o aumento da precipitação pluviométrica. O período de estiagem na época seca, provavelmente, promove baixas perdas de nitrogênio pelo processo de lixiviação de nutrientes e conseqüentemente aumenta os teores de BMS-N, diminuindo a relação C/N_{mic} em alguns casos para 1,3, como observado no perfil 56 (Tabela 6). Baixos valores de relação C/N_{mic} (2,1) também foram observados por BARRETO et al., (2008) estudando diferentes idades de plantações de eucalipto.

Tabela 6: Atributos de biomassa microbiana do solo sob diferentes ambientes nas épocas chuvosa e seca, Coari - AM.

Época	Ambiente	BMS-C	BMS-N	Csol	Nsol	CNmic	CM:CO	RBS	qCO ₂	Ug
	 mg C kg ⁻¹ solo						%	mg C-CO ₂ kg ⁻¹ solo h ⁻¹	mg C-CO ₂ g ⁻¹ BM h ⁻¹
Chuvosa	P35	351 (±35)	39 (±8)	48 (±5)	22 (±1)	9,5 (±1)	2,7 (±0,4)	0,52 (±0,1)	1,5 (±0,2)	27,7 (±2,3)
	P55	344 (±33)	53 (±9)	45 (±2,7)	18 (±1,7)	6,7 (±0,6)	1,9 (±0,02)	0,49 (±0,05)	1,5 (±0,1)	26,9 (±0,8)
	P56	128 (±21)	25 (±5)	25 (±5)	19 (±2)	5,8 (±1,6)	1,1 (±0,17)	0,69 (±0,1)	5,8 (±0,4)	29,3 (±1,5)
	ACR	122 (±24)	25 (±8)	26 (±9)	17 (±1)	7,8 (±4,6)	1,2 (±0,35)	0,59 (±0,24)	8,5 (±1,1)	21 (±1,5)
	AES	19 (±5,6)	5 (±0,6)	24 (±0,7)	15 (±3)	3,8 (±1,4)	0,3 (±0,06)	0,31 (±0,04)	10,5 (±0,5)	10,3 (±0,2)
Seca	P35	303 (±54)	76 (±4)	78 (±19)	6 (±3,5)	3,9 (±0,5)	2,4 (±0,6)	0,46 (±0,005)	1,6 (±0,26)	25,5 (±1,2)
	P55	71 (±9)	66 (±14)	108 (±0,3)	26 (±1,8)	1,3 (±0,5)	0,4 (±0,03)	0,43 (±0,13)	6,2 (±1,8)	23 (±1,3)
	P56	124 (±15)	78 (±15)	62 (±2)	5 (±0,8)	1,7 (±0,3)	1,0 (±0,1)	0,52 (±0,06)	5,1 (±0,4)	24,8 (±3,5)
	ACR	89 (±12,5)	22 (±2,4)	38 (±11)	3 (±0,4)	4,2 (±0,7)	0,8 (±0,15)	0,33 (±0,08)	3,9 (±0,7)	16,4 (±0,6)
	AES	nd	28 (±3,5)	57 (±1,7)	8 (±1,4)	nd	nd	0,15 (±0,03)	nd	6,6 (±0,4)

Valor entre parênteses corresponde ao erro padrão da média. Perfis P35 (topo da paisagem), P55 (terço médio de paisagem) e P56 (terço inferior de encosta) da toposequência de solos sob floresta. ACR: área de clareira reflorestada; AES: área de empréstimo de solo. Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (BMS-C, BMS-N); carbono e nitrogênio solúveis (Csol, Nsol); relação BMS-C/BMS-N (CNmic); relação BMS-C/Corg (CM:CO); respiração da BMS (RBS); quociente metabólico (qCO₂); umidade gravimétrica (Ug). nd: não determinado.

Tabela 7: Atributos químicos e as frações granulométricas areia, silte e argila do solo sob diferentes ambientes, Coari - AM.

Ambiente	Corg g kg ⁻¹	pH água 1:2,5	Al	Ca cmol _c dm ⁻³	Mg	P mg L ⁻¹	K	CTC cmol _c dm ⁻³	Areia%	Silte	Argila
P35	13,1 (±1,8)	3,8 (±0,03)	2,9 (±0,3)	1,8 (±0,1)	0,9 (±0,07)	1 (±0)	2 (±0)	13,1 (±1,4)	65,3 (±0,8)	15,9 (±4,9)	18,7 (±4,3)
P55	18,2 (±1,1)	3,9 (±0,06)	3,9 (±0,2)	1,7 (±0,4)	1 (±0,09)	2,3 (±0,9)	2,7 (±0,3)	13,3 (±0,2)	65,8 (±1,5)	17 (±2,2)	17,2 (±0,7)
P56	12,2 (±0,6)	4,2 (±0,03)	1,2 (±0,09)	1,8 (±0,2)	1,1 (±0,2)	1,7 (±0,3)	2,3 (±0,3)	8,2 (±0,8)	77,6 (±3,5)	11,2 (±4,1)	11,2 (±4,3)
ACR	11 (±1,4)	4,6 (±0,24)	1,2 (±0,4)	3 (±0,6)	1,4 (±0,3)	12,3 (±5,2)	2 (±0)	9,2 (±0,6)	47,2 (±1,4)	23,2 (±1,8)	29,6 (±2,3)
AES	6,8 (±2,6)	8,3 (±0)	0 (±0)	6,5 (±1)	2 (±0,6)	6,3 (±3,4)	2,3 (±0,3)	8,5 (±0,8)	58,9 (±0,2)	14,2 (±5,2)	26,9 (±5,4)

Valor entre parênteses corresponde ao erro padrão da média. Perfis P35 (topo da paisagem), P55 (terço médio de paisagem) e P56 (terço inferior de encosta) da toposequência de solos sob floresta. ACR: área de clareira reflorestada; AES: área de empréstimo de solo.

O quociente metabólico (qCO_2) indicou maiores perdas de C do solo nas áreas antropizadas (ACR e AES), pois a retirada dos horizontes superficiais do solo acarreta no declínio de substrato disponível para uso pela BMS, restringindo a reprodução microbiana e promovendo baixa eficiência metabólica da BMS (Tabela 6). Segundo SOUZA et al. (2006), maiores valores de qCO_2 são encontrados em condições ambientais estressantes, nas quais a biomassa microbiana consome mais carbono para sua manutenção. BALOTA et al. (1998) e OCIO & BROOKES (1990), observaram que a respiração basal por unidade de biomassa microbiana (qCO_2) diminui em agroecossistemas mais estáveis, porém, com a retirada e substituição da cobertura vegetal ocorreu a decomposição mais acelerada dos resíduos vegetais, aumentando o quociente metabólico.

Na Tabela 8 é apresentada a análise de correlação de Pearson entre os atributos de BMS (BMS-C, BMS-N, C/Nmic, Csol, Nsol, CM:CO, RBS e qCO_2), químicos (pH, Al trocável, Corg, Ntot, Ca, Mg, P, K e CTC) e granulométricos (areia, silte e argila). O quociente microbiano (CM:CO) apresentou correlação positiva com o C e N da BMS (BMS-C e BMS-N) e correlação negativa com o quociente metabólico (qCO_2), indicando que quanto maior o valor de CM:CO mais eficiente é a atividade metabólica da BMS, com menor perda de carbono do sistema (Tabela 8). Segundo SAMPAIO et al. (2008), um alto quociente microbiano indica matéria orgânica muito ativa e sujeita a transformações.

Nota-se que a umidade gravimétrica apresenta correlação positiva com a BMS (BMS-C e BMS-N) e com a RBS, comprovando o maior acúmulo de carbono na BMS e a maior atividade respiratória na época chuvosa. O aumento do Corg favoreceu os teores de C e N da BMS e do compartimento solúvel do solo (Csol e Nsol; Tabela 8).

Tabela 8: Coeficiente de correlação linear de Pearson (r) dos atributos estudados, Coari - AM.

	BMS-C	BMS-N	Csol	Nsol	CNmic	CM:CO	RBS	qCO2	Ug	pH	Al	Corg	Ca	Mg	P	K	CTC	Areia	Silte	Argila
BMS-C	1,00																			
BMS-N	0,74	1,00																		
Csol	0,47	0,61	1,00																	
Nsol	0,39	0,48	0,77	1,00																
CNmic	0,54	0,05	-0,13	0,08	1,00															
CM:CO	0,93	0,55	0,19	0,11	0,68	1,00														
RBS	0,48	0,63	0,21	0,08	0,07	0,38	1,00													
qCO2	-0,75	-0,57	-0,58	-0,32	-0,28	-0,69	-0,07	1,00												
Ug	0,76	0,89	0,40	0,32	0,34	0,66	0,78	-0,44	1,00											
pH	-0,74	-0,75	-0,42	-0,35	-0,44	-0,65	-0,74	0,37	-0,92	1,00										
Al	0,81	0,79	0,74	0,71	0,22	0,59	0,42	-0,60	0,69	-0,74	1,00									
Corg	0,51	0,71	0,69	0,80	0,08	0,24	0,49	-0,26	0,62	-0,68	0,79	1,00								
Ca	-0,68	-0,74	-0,42	-0,34	-0,31	-0,59	-0,77	0,37	-0,88	0,92	-0,70	-0,63	1,00							
Mg	-0,60	-0,55	-0,40	-0,47	-0,51	-0,52	-0,51	0,40	-0,65	0,63	-0,56	-0,63	0,50	1,00						
P	-0,40	-0,65	-0,62	-0,29	0,30	-0,23	-0,41	0,54	-0,47	0,30	-0,46	-0,38	0,26	0,50	1,00					
K	-0,16	0,04	0,25	0,40	-0,24	-0,22	-0,19	-0,11	-0,07	0,03	0,15	0,17	-0,16	0,21	0,05	1,00				
CTC	0,60	0,55	0,83	0,66	0,16	0,38	0,03	-0,61	0,38	-0,48	0,74	0,63	-0,33	-0,33	-0,35	0,06	1,00			
Areia	0,24	0,54	0,34	0,30	-0,11	0,17	0,30	-0,25	0,48	-0,29	0,21	0,26	-0,34	-0,26	-0,59	0,30	0,12	1,00		
Silte	0,12	0,00	-0,33	-0,07	0,24	0,15	-0,01	0,07	0,02	-0,10	0,14	0,16	-0,15	0,05	0,48	-0,07	-0,12	-0,56	1,00	
Argila	-0,39	-0,64	-0,14	-0,31	-0,06	-0,33	-0,35	0,24	-0,59	0,42	-0,36	-0,44	0,53	0,27	0,32	-0,30	-0,04	-0,75	-0,12	1,00

*/ Valor em negrito é significativo no nível de 5%.

5.3.2 Análise de componentes principais (ACP)

A Tabela 9 mostra os valores de variância, a contribuição da variável e a contribuição do ambiente de cada componente principal nas duas épocas (chuvosa e seca). A ACP permitiu resumir o conjunto das 20 variáveis originais em 4 componentes principais. Na época chuvosa, os dois primeiros componentes principais explicaram 80 % da variância total dos dados, enquanto na época seca este percentual caiu para 76 %. Deste percentual o componente principal 1 (F1) explica 62 e 53 % da variabilidade do conjunto dos dados na época chuvosa e seca, respectivamente. As variáveis com maior capacidade discriminatória no processo de formação dos agrupamentos pelo componente principal 1 (F1), foram: Mg (7,8 %), qCO₂ (7,7 %) e BMS-C (7,2 %) na época chuvosa e Mg (8,9 %), Ug (8,6 %), Ca (7,9 %) e RBS (7,9 %) na época seca. No componente principal 2 (F2), foram: areia (21,1 %), silte (24,9 %) e argila (14,9) na época chuvosa e K (18,9 %), CNmic (19,7 %) e CM:CO (10,3 %) na época seca.

Nas duas épocas a área de empréstimo de solo (AES) foi o ambiente que mais contribuiu para a identificação do padrão de agrupamento do conjunto de dados, mostrando-se a área mais distinta e com correlação negativa com a maioria dos atributos de matéria orgânica do solo (MOS). Dos atributos químicos os teores de Mg e Ca foram os indicadores mais discriminantes para identificar o agrupamento dos dados, atribuído ao manejo com calagem nas áreas com maior grau de antropização. Dos atributos de MOS, foram o qCO₂, o BMS-C e a RBS, demonstrando o poder de discriminação das variáveis microbianas do solo em áreas submetidas a diferentes sistemas de uso da terra (Tabela 9).

Tabela 9: Autovalor, variância, contribuição da variável e contribuição do ambiente para os quatros componentes principais, Coari - AM.

Época Chuvosa	F1	F2	F3	F4	Época seca	F1	F2	F3	F4
Autovalor	12,4	3,6	2,5	1,5	Autovalor	10,7	4,5	3,2	1,6
Variância (%)	62,2	18,2	12,3	7,3	Variância (%)	53,3	22,7	15,8	8,2
Variância acumulada %	62,2	80,4	92,7	100,0	Variância acumulada %	53,3	76,0	91,8	100,0
Contribuição da variável (%)	F1	F2	F3	F4	Contribuição da variável (%)	F1	F2	F3	F4
BMS-C	7,2	0,8	2,9	0,3	BMS-C	3,8	8,3	3,2	7,3
BMS-N	6,8	0,7	1,7	5,6	BMS-N	7,6	0,5	5,2	0,2
Csol	5,7	0,9	8,4	3,8	Csol	4,9	5,8	2,4	8,6
Nsol	5,8	0,0	2,4	15,3	Nsol	1,7	9,1	11,7	1,8
CNmic	4,3	9,0	2,7	4,8	CNmic	0,7	19,7	0,7	0,1
CM:CO	6,6	2,4	0,1	6,0	CM:CO	2,9	10,3	3,9	5,6
RBS	1,8	0,1	28,3	5,0	RBS	7,9	0,8	0,9	5,8
qCO ₂	7,7	0,0	1,4	0,2	qCO ₂	3,6	0,6	5,5	25,1
Ug	6,5	0,6	6,3	1,0	Ug	8,6	1,1	0,3	1,5
pH	6,5	0,6	5,6	2,4	pH	7,2	3,2	0,9	3,6
Al	6,8	0,5	4,6	1,8	Al	6,8	0,0	6,5	4,3
Corg	6,3	0,0	1,5	12,7	Corg	7,1	0,4	7,2	0,1
Ca	6,6	0,0	5,4	2,7	Ca	7,9	1,7	0,3	4,4
Mg	7,8	0,0	1,2	0,4	Mg	8,9	0,9	0,3	0,1
P	3,3	12,4	1,6	7,0	P	5,1	3,5	6,5	5,7
K	0,1	9,3	12,7	23,0	K	0,5	18,9	2,3	0,6
CTC	5,2	1,9	11,2	0,8	CTC	4,4	0,0	5,7	21,3
Areia	1,7	21,1	0,5	0,8	Areia	3,8	4,8	11,6	0,9
Silte	0,0	24,9	0,0	6,4	Silte	0,5	7,8	18,8	0,1
Argila	3,4	14,9	1,4	0,0	Argila	6,1	2,6	6,1	2,5
Contribuição do ambiente (%)	F1	F2	F3	F4	Contribuição do ambiente (%)	F1	F2	F3	F4
P35	22,3	4,5	0,0	53,2	P35	14,0	21,9	7,1	37,0
P55	18,8	0,4	30,8	30,0	P55	18,3	24,3	37,1	0,3
P56	0,4	42,6	35,6	1,3	P56	6,2	2,7	33,7	37,4
ACR	6,1	48,7	15,6	9,6	ACR	12,2	34,9	18,4	14,5
AES	52,3	3,8	17,9	5,9	AES	49,3	16,2	3,6	10,8

Perfis P35 (topo da paisagem), P55 (terço médio de paisagem) e P56 (terço inferior de encosta) da toposequência de solos sob floresta. ACR: área de clareira reflorestada; AES: área de empréstimo de solo. BMS-C, BMS-N: carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo; Csol e Nsol: carbono e nitrogênio solúveis; CNmic: relação BMS-C/BMS-N; CM:CO: relação BMS-C/Corg; RBS: respiração da BMS; qCO₂: quociente metabólico; Ug: umidade gravimétrica; pH em água; Al: alumínio; Corg: carbono orgânico; Ntot: nitrogênio total; CN: relação Corg/Ntot.

A Figura 7 representa graficamente a análise de componentes principais (ACP) em duas dimensões, através do eixo 1 (F1) e do eixo 2 (F2). Optou-se em gerar o gráfico somente com as variáveis de BMS e constituintes lábeis da MOS para melhor ilustrar o efeito da época na dinâmica da BMS. A distribuição espacial das 8 variáveis originais (BMS-C, BMS-N, Csol, Nsol, CNmic, CM:CO, RBS e qCO₂) está representada por setas e a dos ambientes (perfis P35, P55 e P56, área de clareira reflorestada (ACR) e área de empréstimo de solo (AES)) por triângulos.

O componente principal 1 (F1) separou nitidamente a área com maior grau de antropização (AES) da floresta natural na Amazônia. Já o componente principal 2 (F2) distinguiu a época de amostragem, com maiores valores de BMS-C, respiração (RBS) e quociente microbiano (CM:CO) no período das chuvas (Ep1), indicando uma BMS mais ativa

e com maior imobilização de C na sua estrutura celular (Figura 7). Segundo SANTANA (2000), a maior precipitação pluviométrica leva à maior produção de biomassa vegetal, à maior acumulação de matéria orgânica no solo e, conseqüentemente, ao aumento da ação dos microrganismos, pela maior quantidade de substrato disponível. O estudo de ARAÚJO et al., (2003) confirma que o aumento da quantidade de água e nutrientes no solo na época do verão favorece a atividade dos microrganismos, e BALOTA et al., (1998), observaram menores valores de RBS durante o inverno. Isto ocorre, pois a RBS é influenciada pela temperatura, umidade, aeração e disponibilidade de substratos no solo (CATTELAN & VIDOR, 1990).

A ACP separou as áreas em três grupos em função da similaridade das variáveis levantadas, e este agrupamento foi dependente da época de amostragem. Na época chuvosa o primeiro grupo compreendeu os perfis P35 e P55, representando os CAMBISSOLOS, o segundo o perfil P56 (GLEISSOLO) e a ACR, e o terceiro a AES. Na época seca, a única mudança no agrupamento dos dados foi com relação ao perfil P55, que se distanciou do perfil P35 e passou a fazer parte do segundo grupo (perfil P56 e ACR; Figura 7). Isto ocorre, pois a biomassa microbiana responde intensamente às flutuações sazonais de umidade e temperatura (GAMA-RODRIGUES & GAMA-RODRIGUES, 2008), o que repercutiu na variação temporal da BMS durante as épocas, e que, provavelmente, esta variação além de depender da classe de solo, também depende do relevo local, pois este pode favorecer ou não a infiltração de água no solo.

O GLEISSOLO, devido às características de constante saturação de água no solo, limitou o desenvolvimento de microrganismos aeróbios e apresentou menor teor de BMS-C quando comparado ao solo de topo de paisagem (CAMBISSOLO).

A área de empréstimo de solo (AES) é a mais distinta dos diferentes sistemas de uso e cobertura vegetal do solo, apresentando correlação negativa com a maioria dos atributos de BMS (Figura 7). Isso ocorre em razão do menor teor de substrato disponível e pela ausência de proteção conferida pela matéria orgânica do solo. VARGAS & SCHOLLES (2000), afirmam que os resíduos mantidos na superfície do solo constituem-se em fonte de C e nutrientes, além de proporcionar menores variações de temperatura e umidade, sendo a BMS estimulada pela maior disponibilidade de C orgânico na superfície do solo.

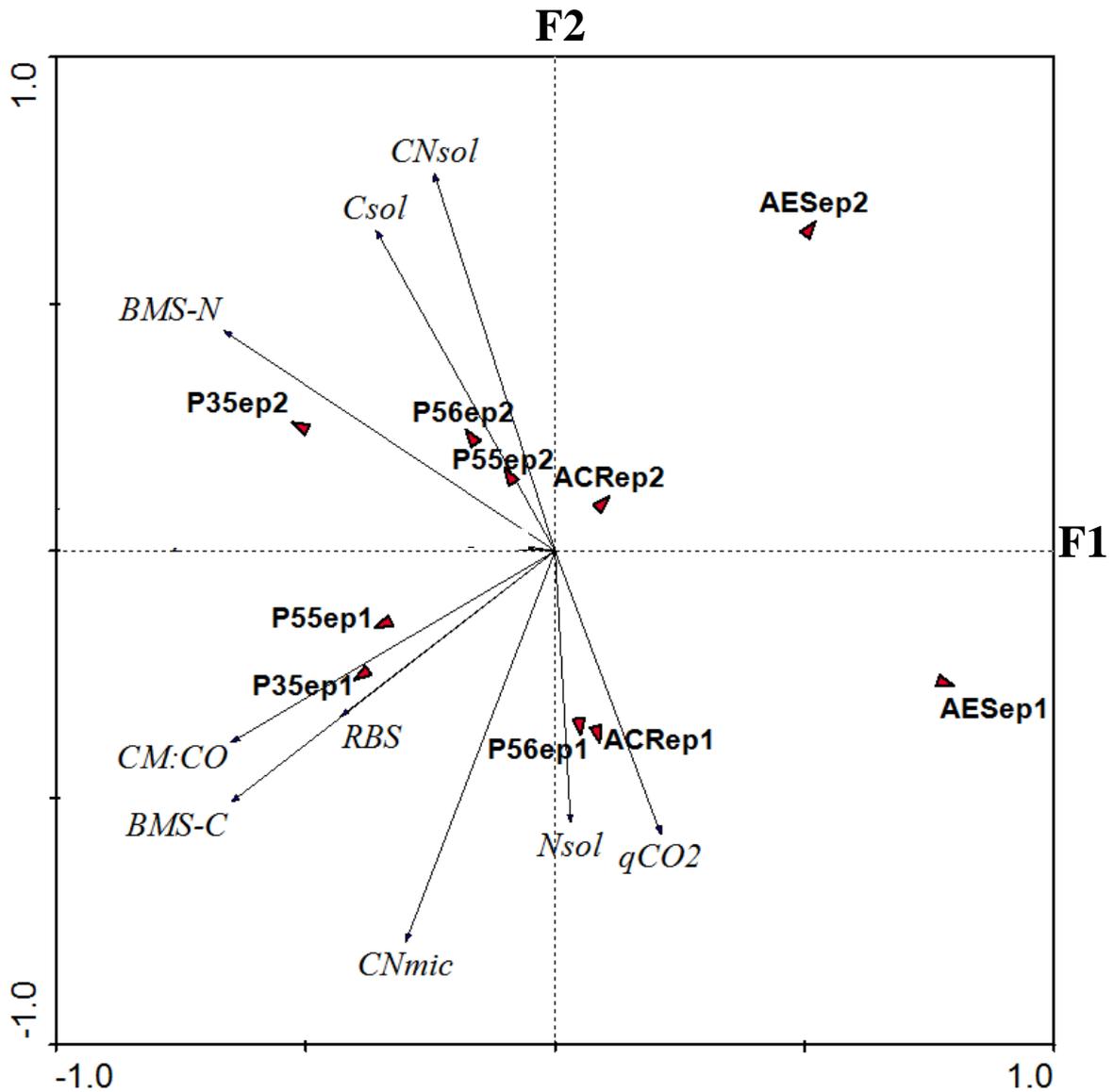


Figura 7: Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos de BMS dos diferentes sistemas de uso e cobertura vegetal do solo, Coari - AM.

Perfis P35, P55, P56; ACR: área de clareira reflorestada; AES: área de empréstimo de solo; ep1: época chuvosa; ep2: época seca; Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (BMS-C; BMS-N); carbono e nitrogênio da biomassa microbiana “plus” (BMSp-C, BMSp-N); relação BMS-C/BMS-N (CNmic); relação BMSp-C/BMSp-N (CNpmic); relação BMS-C/Corg (CM:CO); carbono solúvel (Csol); nitrogênio solúvel (Nsol); relação C/N solúvel (CNsol); respiração basal do solo (RBS); quociente metabólico (qCO_2).

5.4 CONCLUSÕES

O impacto negativo gerado pelas atividades antrópicas promove baixa eficiência metabólica da BMS mesmo após oito anos de reflorestamento da área de clareira com espécies nativas da região como o ingá (*Inga sp.*), a goiaba-de-anta (*Bellucia dichotoma*), a samaúma (*Ceiba pentandra Gaertn*), o buriti (*Mauritia vinifera*) e o açazeiro (*Euterpe oleracea*) entre outras, porém mostra tendência de recuperação nos teores de Corg e BMSC em relação a área de empréstimo de solo.

Os solos de topo de paisagem cobertos com floresta natural, com condições de boa drenagem e a época chuvosa, aumentam os teores de carbono da biomassa microbiana do solo, com cerca de 2 a 3 % do total de Corg estocado na estrutura celular dos microrganismos. Isto mostra que a variação da BMS depende dos atributos da paisagem como o relevo local, o tipo de solo e o grau de antropização do uso da terra, além de apresentar sazonalidade ao decorrer do ano, comprovando a alta sensibilidade da BMS às variações climáticas (temperatura e umidade) e a sua dependência topográfica, indicando que para o mapeamento da BMS estes atributos devem ser considerados.

5.5 ANEXO 1

5.5.1 Perfil P035

Classificação: CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico A moderado hiperdistrófico (CXa)

Data: 12/10/2008

Localização: Coordenadas UTM: N 244130.99 E 9460240.78

Articulação: Folha 03 (RUC)

Relevo regional: Suave ondulado a ondulado

Relevo local: Plano

Pedregosidade: Não pedregoso

Rochosidade: Não rochoso

Situação e declive no perfil: Topo de elevação 1% declividade

Drenagem: Bem drenado

Erosão: Não aparente

Vegetação primária: Floresta Tropical Equatorial

Descrito e coletado: Marcos Bacis Ceddia, Orlando Tavares, Diego Campana Loureiro, André Villela, Geraldo Simões e Gilson Barreiras

A 0-19 cm; Bruno (10YR 5/3, úmido); Franco-arenosa; forte, muito pequeno e pequeno, granular; macia, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

AB 19-35 cm; Bruno-amarelado (10YR 5/4, úmido); Franco-argiloarenosa; forte, muito pequena e pequena, blocos sub angulares; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição clara e plana.

BA 35-73 cm; Bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, úmido); Franco-argiloarenosa; forte, muito pequena, blocos sub angulares; ligeiramente dura, firme, plástica e muito pegajosa; transição gradual e plana.

Bi₁ 73-106 cm; Bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/4, úmido); Franco-argiloarenosa; forte, muito pequena e pequena, blocos sub angulares; ligeiramente dura, friável, plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.

Bi₂ 106-145 cm; Amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, úmido); Argila; forte, muito pequena e pequena, blocos sub angulares; dura, firme, muito plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.

BC 145-165⁺ cm; Rosado (7,5YR 7/4, úmido); mosqueado comum, pequeno, distinto Rosado (2,5YR 8/4, úmido) Argila; moderado, muito pequena e pequena, blocos angulares; extremamente dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa.

Observações:

- 1- Perfil descrito e coletado em jazida interditada;
- 2- Raízes muitas e finas no horizonte A; comuns e média no AB; comuns e finas no BA; poucas e finas no Bi_1 e raras e finas no B_2 e BC.
- 3- Poros muito pequeno e pequeno em todos os horizontes.



Perfil P035 – Análises Físicas e Químicas

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/kg				Argila dispersa em água g/kg	Grau de Floculação %	silte argila	Densidade kg/dm ³		Poros. Cm ³ /100cm ³
Símbolo	Profund. cm	Calhaus > 20 Mm	Cascalho 20-2 mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 Mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 mm				Solo	Partícula	
A	0-19	-	-	100	86	509	227	178	16	91	1.28	1.12	2.32	0.517
AB	19-35	-	-	100	73	443	227	257	53	79	0.88	1.28	2.29	0.441
BA	35-73	-	-	100	69	429	217	285	28	91	0.76	1.43	2.40	0.404
Bi ₁	73-106	-	-	100	65	409	221	305	72	76	0.72	1.42	2.22	0.360
Bi ₂	106-145	-	-	100	58	311	221	410	47	89	0.54	1.46	2.36	0.381
BC	145-165 ⁺	-	-	100	44	318	188	450	56	88	0.42	1.44	2.26	0.363
Horiz.	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol _c /dm ³								Valor V	100Al ³⁺	P ass.	
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	3.5	-	1.70	1.00	0.01	0.01	2.72	5.75	4.45	12.92	21	68	5	
AB	4.1	-	1.40	0.90	0.01	0.01	2.32	5.00	2.80	10.12	23	68	1	
BA	4.4	-	1.30	0.70	0.00	0.01	2.01	5.10	1.40	8.51	24	72	0	
Bi ₁	4.6	-	0.80	0.50	0.00	0.01	1.31	5.25	0.05	6.61	20	80	0	
Bi ₂	4.6	-	0.60	0.50	0.00	0.01	1.11	5.00	0.30	6.41	17	82	0	
BC	4.9	-	0.70	0.40	0.00	0.01	1.11	5.50	0.10	6.71	17	83	0	
Horiz.	C org. g/kg	N g/kg	C N	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0,8%) g/kg						Si O ₂ Al ₂ O ₃ (Ki)	Si O ₂ R ₂ O ₃ (Kr)	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ livre g/kg	Equiv. CaCO ₃ g/kg
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO					
A	14.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AB	10.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BA	7.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₁	5.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₂	5.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BC	4.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) g/100g								g/100g		
		C.E. do Extrato MS/cm 25°C	Água %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima
A	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29.4	-	-	
AB	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.7	-	-	
BA	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.9	-	-	
Bi ₁	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23.7	-	-	
Bi ₂	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27.4	-	-	
BC	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26.8	-	-	

Relação B/A = 1.36

5.5.2 Perfil P055

Classificação: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado álico (CXbd)

Data: 14/10/2008

Localização: Coordenadas UTM: N 244385.80 E 9460670.47 ALT 82

Articulação: Folha 03 (RUC)

Relevo regional: Ondulado

Relevo local: Ondulado

Pedregosidade: Não pedregosa

Rochosidade: Não rochosa

Situação e declive no perfil: Terço médio de paisagem 13% declividade

Drenagem: Bem drenado

Erosão: Ligeira

Vegetação primária: Floresta Tropical Equatorial

Descrito e coletado: André Villela, Geraldo Simões e Gilson Barreiras

A 0-10 cm; Cinzento-escuro (7,5YR 4/1, úmido); Franco-argiloarenosa; fraca e moderada, muito pequena e pequena, blocos sub angulares e granular; macia, muito friável, não plástica e pegajosa; transição clara e plana.

AB 10-39 cm; Bruno (7,5YR 5/3, úmido); Argiloarenosa; moderada, muito pequena e pequena, blocos sub angulares e granular; ligeiramente dura, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

BA 39-61 cm; Bruno (7,5YR 5/4, úmido); Argiloarenosa; moderada, muito pequena, blocos sub angulares; macia, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

Bi₁ 61-103 cm; Vermelho-amarelado (5YR 5/6, úmido); Argiloarenosa; moderada, muito pequena, blocos sub angulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa e plana.

Bi₂ 103-140⁺ cm; Amarelo-avermelhado (5YR 6/6, úmido); Argiloarenosa; forte, pequena, blocos sub angulares; macia, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

Observações:

- 1- Presença de carvão comum em (BA).
- 2- Raízes poucas, finas nos horizontes A, BA e Bi₁; muitas, finas e medias no AB, raras, finas no Bi₂.



Perfil P055 – Análises Físicas e Químicas

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/kg				Argila dispersa em água g/kg	Grau de Floculação %	Rel. silte argila	Densidade kg/dm ³		Poros. Cm ³ /100cm ³
Símbolo	Profund. cm	Calhaus > 20 Mm	Cascalho 20-2 mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 Mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 mm				Solo	Partícula	
A	0-10	-	-	100	181	363	134	322	188	42	0.42	0.82	2.35	0.651
AB	10-39	-	-	100	175	356	107	363	264	27	0.29	1.14	2.60	0.562
BA	39-61	-	-	100	165	359	81	396	296	25	0.20	1.15	2.53	0.545
Bi ₁	61-103	-	-	100	165	359	81	396	296	25	0.20	1.37	2.67	0.487
Bi ₂	103-140 ⁺	-	-	100	169	365	91	375	282	25	0.24	1.43	2.53	0.435
Horiz.	pH (1:2.5)		Complexo sortivo cmol _c /dm ³								Valor V	100Al ³⁺	P ass.	
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	3.9	-	2.50	1.30	0.01	0.00	3.81	4.25	9.75	17.81	21	53	3	
AB	4.1	-	2.00	1.10	0.01	0.00	3.11	4.70	4.50	12.31	25	60	1	
BA	4.6	-	1.10	0.60	0.01	0.00	1.71	3.90	3.20	8.81	19	69	1	
Bi ₁	4.7	-	1.00	0.60	0.01	0.00	1.61	3.05	1.95	6.61	24	65	1	
Bi ₂	4.7	-	0.80	0.60	0.01	0.00	1.41	2.55	1.55	5.51	26	64	1	
Horiz.	C org. g/kg	N g/kg	Rel. C/N C/N	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0.8%) g/kg						Si O ₂ Al ₂ O ₃ (Ki)	Si O ₂ R ₂ O ₃ (Kr)	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ livre g/kg	Equiv. CaCO ₃ g/kg
A	13.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AB	10.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BA	7.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₁	4.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₂	3.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada C.E. do Extrato mS/cm 25°C		Sais solúveis (extrato 1:5) ← cmol _c /kg de TF →								g/100g		
		Água %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima	
A	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49.6	-	-	
AB	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34.9	-	-	
BA	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30.3	-	-	
Bi ₁	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23.7	-	-	
Bi ₂	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.1	-	-	

Relação B/A = 1.14

5.5.3 Perfil P056

Classificação: GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico A moderado (GXvd)

Data: 13/10/2008

Localização: Coordenadas UTM: N 244587.73 E 9460731.66

Articulação: Folha 03 (RUC)

Relevo regional: Suave ondulado e ondulado

Relevo local: Plano

Pedregosidade: Não pedregosa

Rochosidade: Não rochosa

Situação e declive no perfil: Terço inferior de encosta suave 4% declividade próximo de baixada

Drenagem: Muito mal drenado

Erosão: Não aparente

Vegetação primária: Floresta Tropical Equatorial

Descrito e coletado: Marcos Bacis, Orlando Tavares, Diego Campana Loureiro, André Villela

A 0-6 cm; Bruno (7,5YR 4/2, úmido); mosqueado pouco, pequeno, difuso (7,5YR 5/8, úmido); Franco-arenosa; moderada, muito pequena, blocos sub angulares e granular; macia, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

AC 6-15 cm; Cinzento (10YR 5/1, úmido); mosqueado comum, pequeno, distinto Bruno-forte (7,5YR 5/6, úmido); Franco-arenosa; moderada, muito pequena, blocos sub angulares; macia, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

CA 15-25 cm; Cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, úmido); mosqueado comum, pequeno, distinto Amarelo-avermelhado (5YR 6/8, úmido); Franco-arenosa; fraca, muito pequena, blocos sub angulares; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

C_{g1} 25-33 cm; Cinzento-avermelhado-claro (2,5YR 7/1, úmido); mosqueado comum, médio, distinto Amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, úmido); Franco-arenosa; maciça; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

C_{g2} 33-45⁺ cm; Cinzento-avermelhado-claro (2,5YR 7/1, úmido); mosqueado comum, médio, proeminente Amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8, úmido); Franco-arenosa; maciça; ligeiramente dura, friável, não plástica e não pegajosa.

Observações:

- 1- Não coletou amostras para densidade do solo, curva de retenção, penetmetro.
- 2- Raízes muitas, finas e medias nos horizontes A e AC; comuns, finas nos CA e C_{g1}, raras e finas no C_{g2}.



Perfil P056 – Análises Físicas e Químicas

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/kg				Argila	Grau de	Rel. silte	Densidade kg/dm ³		Poros.
Símbolo	Profund. cm	Calhaus > 20 Mm	Cascalho 20-2 mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 Mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 mm	dispersa em água g/kg	Floculação %	argila	Solo	Partícula	Cm ³ /100cm ³
A	0-6	-	-	100	319	411	157	113	6	95	1.39	-	2.38	-
AC	6-15	-	-	100	290	475	129	113	10	91	1.14	-	2.67	-
CA	15-25	-	-	100	319	433	158	90	47	48	1.76	-	2.47	-
Cg ₁	25-33	-	-	100	342	437	134	87	61	30	1.54	-	2.67	-
Cg ₂	33-45 ⁺	-	-	100	374	407	135	84	79	6	1.61	-	2.60	-
Horiz.	pH (1:2.5)		Complexo sortivo cmol _c /dm ³								Valor V	100Al ³⁺	P ass.	
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	4.7	-	2.00	1.00	0.00	0.00	3.00	1.30	3.30	7.60	39	30	5	
AC	4.8	-	1.50	1.00	0.00	0.00	2.50	1.30	2.20	6.00	42	34	3	
CA	5.0	-	1.00	0.50	0.00	0.00	1.50	1.00	1.60	4.10	37	40	2	
Cg ₁	5.1	-	0.50	0.30	0.00	0.00	0.80	0.75	1.60	3.15	25	48	3	
Cg ₂	5.4	-	0.50	0.30	0.00	0.00	0.80	0.25	1.45	2.50	32	24	1	
Horiz.	C org. g/kg	N g/kg	Re1. C/N C/N	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0.8%) g/k g						Si O ₂ Al ₂ O ₃ (Ki)	Si O ₂ R ₂ O ₃ (Kr)	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ livre g/kg	Equiv. CaCO ₃ g/kg
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO					
A	12.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AC	10.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CA	7.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cg ₁	6.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cg ₂	2.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada C.E. do Extrato mS/cm 25°C		Sais solúveis (extrato 1:5) ← cmol _c /kg de TF →								g/100g		
		Água %		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima
A	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AC	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CA	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cg ₁	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cg ₂	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

6 CAPÍTULO III

BIOMASSA MICROBIANA E EMISSÕES DE C-CO₂ EM SOLOS AFETADOS POR PERMAFROST NA ANTÁRTICA MARÍTIMA

RESUMO

O maior aumento das temperaturas devido ao aquecimento global durante as últimas décadas ocorreu na região da Antártica marítima. Nessa região, alguns solos com horizontes que permanecem congelados por mais de dois anos consecutivos, chamados de *permafrost*, são conhecidos por ter considerável estoque de carbono, tendo um potencial de emissões de carbono. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a biomassa microbiana do solo (BMS) e as emissões de CO₂ no verão em solos afetados por *permafrost* selecionados da Antártica marítima. A área de estudo está localizada na costa oeste da Baía do Almirantado, Ilha Rei George – Estação Antártica de Pesquisa H. Arctowski. Compararam-se cinco diferentes ambientes de Tundra Antártica: carpetes de musgo (CMU); cobertura mista de líquens, briófitas e gramíneas (CML); cobertura mista de gramíneas e musgo com predominância da *Deschampsia antarctica* Desv. (Poaceae) (CMG); carpetes de algas terrestres *Prasiola crispa* (PRA) e solo coberto com excrementos de pinguim Adélia *Pygoscelis adeliae* misturados com penas, casca de ovos e restos de animais, conhecido por guano (GUA). Amostras de solo de 0-10 cm de profundidade foram obtidas para determinação do carbono da BMS (BMS-C), carbono solúvel (C_{sol}), quociente metabólico (qCO₂) e respiração microbiana do solo (RBS). A RBS foi medida em laboratório na Estação Antártica de Pesquisa H. Arctowski, com temperatura média de 19 °C (RBS_19 °C) e em condições de campo, temperatura média de 3 °C (RBS_3 °C), com o intuito de avaliar o efeito da temperatura na atividade microbiana. As emissões de C-CO₂ foram medidas no campo, considerando o fluxo total de emissão de C-CO₂ do solo mais a planta. Determinaram-se também as frações granulométricas areia, silte e argila, umidade gravimétrica, bem como os atributos químicos (Ca²⁺, Mg²⁺, P₂O₅, K⁺, C orgânico, N total, Al³⁺, CTC e pH em água). Os valores médios de BMS-C nos solos com coberturas microfíticas de líquens, algas, briófitas e plantas superiores da Tundra Antártica, variaram em torno de 138 a 364 mg C kg⁻¹ solo, com os maiores valores associados as áreas cobertas por líquens, briófitas e gramíneas (CML e CMG). Valores discrepantes de BMS-C (3486 mg C kg⁻¹ solo) e RBS (1,6 mg CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹) foram observados na área de guano, contribuindo com as maiores emissões de CO₂ (42,9 μmol m⁻² s⁻¹), com taxa de emissão de aproximadamente 100 vezes a mais do que a área de solo exposto. Isto indica que o maior acúmulo de C e atividade respiratória da BMS na Antártica estão associados a solos com influência de guano fresco de colônia de pinguins, com cerca de 7 a 8 % do total de Corg do solo estocado na BMS. A área de CMU apresentou os menores valores de BMS-C e RBS, devido a constante saturação de água do solo, reduzindo a atividade dos microrganismos aeróbios e o desenvolvimento da BMS. A RBS variou de acordo com a temperatura, com um máximo de 19 °C, devendo-se considerar as condições climáticas locais durante a sua análise, evitando desta forma superestimativas ou subestimativas da sua atividade. O qCO₂ calculado indica grandes diferenças entre os tipos de cobertura do solo, com menor valor na área CMG, indicando ser o ambiente com menor perda relativa de carbono, ilustrando o seu papel na dinâmica de carbono nos ecossistemas terrestres. Os resultados obtidos confirmam a importância da avaliação “in situ” do funcionamento dos ecossistemas terrestres da Antártica, oferecendo novas percepções sobre o nível de emissões de carbono que pode ser esperado, sob o cenário presente de aumento da temperatura.

Palavras-chave: Quociente metabólico, quociente microbiano, Ilha Rei George.

ABSTRACT

The largest increase in temperature due to global warming in recent decades occurred in the region of the maritime Antarctic. In this region, some soils with horizons that remain frozen for more than two consecutive years, called permafrost, are known to have considerable stock of carbon, having a potential for carbon emissions. The objective of this study was to evaluate the soil microbial biomass (SMB) and CO₂ emissions in the summer in soils affected by permafrost selected maritime Antarctic. The study area is located on the west coast of Admiralty Bay, King George Island - Antarctica Research Station H. Arctowski. We compared five different environments of Antarctic Tundra: carpets of moss (CMU), mixed cover of lichens, mosses and grasses (CML), cover of grasses and moss mixed with a predominance of *Deschampsia antarctica* Desv. (Poaceae) (CMG); carpets of terrestrial algae *Prasiola crispa* (PRA) and soil covered with excrement of Adelie penguin *Pygoscelis adeliae* mixed with feathers, egg shells and animal remains, known as guano (GUA). Soil samples from 0-10 cm depth were obtained for carbon SMB (SMB-C), soluble carbon (Csol), metabolic quotient (qCO₂) and soil microbial respiration (RBS). The RBS was measured in the laboratory on Antarctic Research Station H. Arctowski, with temperatures averaging 19 °C (RBS_19 °C) and under field conditions, an average temperature of 3°C (RBS_3 °C), in order to evaluate the effect of temperature on microbial activity. The emission of CO₂ was measured in the field, considering the total flux of CO₂ soil over the plant. It also determined the fractions sand, silt and clay, gravimetric moisture content, as well as the chemical (Ca²⁺, Mg²⁺, P₂O₅, K⁺, organic C, total N, Al³⁺, CEC and pH in water). The mean values of SMB in soil cover with lichens, algae, bryophytes and higher plants on Antarctic tundra, ranging from 138 to 364 mg C kg⁻¹ soil, with higher values associated with the areas covered by lichens, bryophytes and grasses (CMG and CML). Outliers of SMB (3486 mg C kg⁻¹ soil) and RBS (1.6 mg CO₂ kg⁻¹ soil h⁻¹) were observed in the area of guano, contributing to largest emissions of CO₂ (42.9 μmol m⁻² s⁻¹), being this emission rate of about 100 times more than the area of bare soil. This indicates that the greater accumulation of C and respiratory activity of SMB in Antarctic area are associated with soils with fresh guano, with about 7-8% of total soil organic C stored in the SMB. The CMU area had the lowest values of SMB and RBS, due to constant water saturation of the soil, reducing the activity of aerobic microorganisms and the development of SMB. The RBS varied with temperature, with a maximum of 19°C, one should consider local climatic conditions during their analysis, thus avoiding overestimation or underestimation of their activity. The calculated qCO₂ indicates major differences between the types of soil cover with smallest value in the CMG, indicating that the environment with lower relative loss of carbon, illustrating its role in carbon dynamics in terrestrial ecosystems. The results confirm the importance of evaluation "in situ" of the functioning of terrestrial ecosystems of Antarctica, offering new insights into the level of carbon emissions that can be expected under the present scenario of increasing temperature.

Keywords: Metabolic quotient, microbial quotient, King George Island.

6.1 INTRODUÇÃO

Medidas de BMS na Antártica vêm sendo realizadas desde a década de 1970 e o número de estudos tem aumentado consideravelmente (HOLDING et al., 1974; ROSER et al., 1993; BOLTER, 1994; LAVIAN et al., 2001; COWAN et al., 2002; TSCHERKO et al., 2003). O interesse por este assunto vem crescendo devido a importância da BMS no ciclo global do carbono, pois os microrganismos além de representar um reservatório de C do solo, atuam na mineralização da matéria orgânica do solo (MOS) com potencial de realimentação das mudanças climáticas devido ao provável aumento da temperatura do planeta.

Estima-se que a temperatura atmosférica da superfície global, para o final do século XXI, poderá aumentar em até 6,4 °C, dependendo do cenário (IPCC 2007). Uma grande fonte de incerteza, segundo ZHANG et al. (2005), é o efeito do aumento da temperatura na BMS, que exerce influência no balanço de C nos ecossistemas terrestres por meio do controle da decomposição da MOS e a disponibilidade de nutrientes para as plantas. A capacidade de liberar ou manter este estoque de carbono está associado à atividade da BMS. Esta biomassa contém parte do estoque global de carbono, em média, de 2 a 5 % do carbono orgânico do solo (JENKINSON & LADD, 1981), e atua sobre o compartimento total pela interferência, principalmente, sobre as formas de carbono lábil, com três diferentes possibilidades – função catalisadora, fonte e/ou reserva de nutrientes (PAUL & CLARK, 1989; WARDLE, 1992). Embora muitos avanços tenham sido obtidos nos últimos anos em relação aos levantamentos de estoques de carbono, pouco ou nada tem sido discutido nos fóruns mudanças climáticas sobre a dinâmica da biomassa microbiana do solo e a importância do compartimento lábil tem sido discutida superficialmente.

Na Antártica marítima o clima é mais ameno em relação a Antártica continental (CAMPBELL & CLARIDGE, 1987), com valores mais altos de temperatura e precipitação, favorecendo o surgimento de áreas livres de gelo. Estas áreas são colonizadas, principalmente, por animais marinhos, como os pinguins, as Skuas e as focas, e pela vegetação, tais como os musgos, as briófitas, os líquens, as algas terrestres e raras plantas vasculares, como a *Deschampsia antarctica* e a *Colobanthus quitensis* (ZHU et al., 2008; KOZERETSKA et al., 2010; PARNIKOZA et al., 2008). A interação destes animais marinhos e este tipo de vegetação formam o ecossistema de Tundra Antártica (TATUR & MYRCHA, 1984; SUN et al., 2002). No caso específico da Estação Antártica de Pesquisa H. Arctowski, PARNIKOZA et al. (2008) e KOZERETSKA et al. (2010) classificaram as comunidades vegetais como “formação herbácea de Tundra Antártica”, porém não consideraram os líquens nesta formação.

Os ecossistemas costeiros da Antártica são repletos de colônias de pinguins, que afetam a área diretamente ocupada e adjacências através da deposição de excrementos, penas, casca de ovos e restos de animais, conhecidos por guano (MYRCHA & TATUR, 1991). O produto da mineralização deste elevado aporte de materiais orgânicos e sua interação com o substrato mineral dão origem aos solos ornitogênicos (TATUR & BARCZUK, 1983), ou seja, solos afetados por atividade de aves, o qual constituem um dos principais reservatórios de C orgânico na Antártica (BLUME et al., 2002; BEYER et al., 2004; MICHEL et al., 2006; SIMAS et al., 2007, 2008). Estes solos são caracterizados com alta concentração de nutrientes provenientes de antigas e atuais colônias de aves, principalmente pinguins, dando origem aos solos conhecidos por ornitogênicos (TATUR & MYRCHA, 1984; MICHEL, 2005).

Na Antártica, além dos solos ornitogênicos, é comum a presença de solos com horizontes que permanecem congelados (temperatura menor que 0 °C) por mais de dois anos consecutivos, chamados de *permafrost* (SCHAEFER et al., 2008; SIMAS et al., 2008; KIMBLE, 2004), e normalmente apresentam uma camada ativa, que é definida como a porção do solo que experimenta congelamento e descongelamento sazonal (BROWN et al., 2000).

Solos com *permafrost* cobrem 20% da superfície do planeta e possuem, reconhecidamente, uma grande capacidade potencial de emissão de gases de efeito estufa, influenciando toda a dinâmica climática da Terra (SLAYMAKER & KELLY, 2007). Nesses solos, grande quantidade de biomassa vegetal se acumula, tanto na superfície quanto no *permafrost* (BOCKHEIM & TARNOCAL, 1998; DAVIDSON & JANSSENS, 2006), com estimativas de que o “pool” de carbono estocado nos solos com *permafrost* do planeta até a profundidade de 3 m é de 400 Pg de C (GRUBER et al., 2004; DAVIDSON & JANSSENS, 2006).

Geralmente solos afetados por *permafrost* ocorrem em altas latitudes (hemisfério norte “Ártico” e hemisfério sul “Antártica”), em regiões onde é esperado maior efeito do aquecimento global (ARCTIC CLIMATE IMPACT ASSESSMENT, 2004; CHAPIN, 2005). A maioria dos solos da Estação Antártica de Pesquisa H. Arctowski são afetados por *permafrost* (KUHN, 1997), sendo que o derretimento do *permafrost* e o aumento da temperatura do solo como um todo favorece uma maior atividade microbiana, expondo compostos orgânicos, antes protegidos pelo gelo, à ação dos microrganismos (OSTERKAMP & ROMANOVSKY, 1999; SERREZE, 2000).

Como consequência, há um crescente interesse pela importância dos ecossistemas polares no balanço global do carbono, pois solos afetados por *permafrost* irão desempenhar um papel importante na determinação das consequências do aquecimento global para o ciclo do carbono terrestre. O papel destes sistemas como fonte ou sumidouro de CO₂ em diferentes condições climáticas não é claro (BILLINGS, 1987), necessitando de estudos nesta linha de pesquisa.

Pesquisas indicam que até a década de 70 os solos com *permafrost* do hemisfério norte (Ártico) funcionavam como “sinks” ou depósitos de carbono, em função da proteção à decomposição condicionada pelo *permafrost* (SIMAS et al., 2008; MICHEL et al., 2006; MICHAELSON et al., 2004). Com o aumento da temperatura média global, observou-se entre os anos 80 e 90, uma inversão do fluxo de carbono, transformando estas áreas em atuais fontes de carbono para a atmosfera (MICHAELSON, et al., 2004; OECHEL & BILLINGS, 1992). Uma estimativa sugere que o aquecimento global pode derreter 25 % da área de *permafrost* em 2100 (ANISIMOV et al., 1999), tornando cerca de 100 Pg C vulneráveis a perdas (GRUBER et al., 2004).

Todavia, a maior parte destes modelos baseia-se em solos do Ártico, aonde o *permafrost* é de fato extramamente rico em C orgânico. Não é muito claro qual seria o impacto deste aumento projetado de temperatura sobre o balanço de C do solo e na economia de C nos ecossistemas terrestres da Antártica. Como a grande maioria dos solos da Antártica são muito pobres em C orgânico existe a possibilidade de que, com o aumento da temperatura global, tais solos se tornem depósito de C atmosférico dada a maior produtividade primária da vegetação e ao aumento da área livre de gelo passível de colonização.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a biomassa microbiana do solo (BMS) e as emissões de C-CO₂ no verão em solos afetados por *permafrost* selecionados da Antártica marítima. Além disso, buscou-se verificar o nível de dependência espacial de atributos de BMS em diferentes coberturas vegetais do solo na Tundra Antártica, com o intuito de reconhecer o padrão de variabilidade espacial.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

6.2.1 Área de estudo

O estudo da biomassa microbiana e emissões de C-CO₂ foi realizado na costa oeste da Baía do Almirantado, nas proximidades da ASPA 128, próxima à Estação Polonesa Henriky Arctowski – Ilha Rei George na Antártica Marítima (Figura 8).

A Ilha Rei George faz parte do arquipélago das Shetlands do Sul, com área de 1250 km², sendo que 93% da sua superfície é coberta por gelo, porém as variações térmico-hídricas devio a um provável aquecimento global, seja ele antrópico ou natural, vem afetando consideravelmente as áreas cobertas por gelo. Estudos indicam que a Ilha Rei George num período de 39 anos apresentou um recuo ou retração de geleira (perda de massa) de aproximadamente 89 km² (ARIGONY NETO, 2001), formando áreas livres de gelo passíveis de colonização.

6.2.2 Clima e vegetação

O clima da ilha Rei George é classificado como polar tipo tundra com padrão “ET” na classificação de Köppen, que se caracteriza por temperaturas médias mais quentes, entre 0° e 10° C (SETZER et al., 2004). A temperatura média anual encontrada no período de 1986 a 2003 foi de -1,8 ° C (RAKUSA-SUSZCZEWSKI, et al., 1993), com a temperatura mínima mais baixa em torno de -23 a -27° C, observada entre os meses de maio a julho, e a temperatura máxima mais alta em torno de 12 a 14 ° C, observada entre os meses de dezembro a fevereiro (Fonte: [www.cptec.inpe.br\antartica](http://www.cptec.inpe.br/antartica)).

O clima na Antártica marítima favorece a formação de líquens e musgos, que são encontrados junto com algas e outras formas primitivas de vida (CAMPBELL e CLARIDGE, 1988). No caso da Tundra Antártica, as diferentes espécies vegetais predominantes são os musgos, briófitas, líquens, algas e plantas vasculares como a *Deschampsia antarctica* e a *Colobanthus quitensis*.

6.2.3 Ambientes avaliados

As amostras foram coletadas durante o verão de 2011 (fevereiro) em um transecto de solos perpendicular a geleira Ecology, especificamente no meio entre a geleira Ecology e a ponta Rakusa, próximo a Estação Antártica de Pesquisa H. Arcotwski (Figura 8).

O transecto foi caracterizado por cobertura de musgo na área mais recente do recuo de geleira, passando por coberturas de líquens, briófitas e gramíneas da espécie *Deschampsia antarctica* e *Colobanthus quitensis* até chegar nas proximidades da praia, com a presença da alga terrestre *Prasiola crispera* e de diversas colônias de pinguim Adélie (*Pygoscelis adeliae*), que afetam a área diretamente ocupada e adjacências com o alto input de material orgânico como excrementos, penas, casca de ovos e animais mortos, conhecidos por guano. Abaixo segue a descrição detalhada dos diferentes ambientes avaliados (Figuras 8 e 9):

- 1) **CMU** – área de carpetes de musgo, localizado em relevo plano próximo a linha de drenagem, com acúmulo de água e encharcamento do solo. É a área mais recente do recuo de geleira, apresentando solo mais arenoso.
- 2) **CML** – área de cobertura mista de líquens (*Usnea Antarctica*), briófitas e gramíneas (*Deschampsia antarctica* e *Colobanthus quitensis*), localizado na parte alta da toposequência, com relevo com classe de declividade suave ondulado. É a área que

apresenta a maior diversidade de espécies vegetais, com predominância de *Usnea Antarctica*.

- 3) **CMG** – área de cobertura mista de gramíneas da espécie *Deschampsia antarctica* e *Colobanthus quitensis* com presença de musgo. Cobertura vegetal predominante de *Deschampsia antarctica*. Está localizado no terço inferior de encosta, com relevo plano e favorável ao acúmulo de água no solo. É a área que apresenta a menor densidade do solo.
- 4) **PRA** – área de cobertura com a alga terrestre *Prasiola crispa*, localizada nas adjacências da área de guano de pinguim Adélia (*Pygoscelis adeliae*), caracterizado por impacto visível do guano. Apresenta solo siltoso e pedregoso, com uma cobertura de alga bem delgada, formando um biofilme sobre o solo.
- 5) **GUA** – área de depósito de excrementos misturados com penas, casca de ovos e restos de animais, proveniente principalmente de colônia ativa de pinguim Adélia (*Pygoscelis adeliae*), conhecido por guano. O solo é mais argiloso e pedregoso, com a maior densidade do solo. É caracterizado como uma terra marrom seca no período de inverno que se altera para uma lama durante o derretimento de geleiras e a maior precipitação pluviométrica durante o verão.

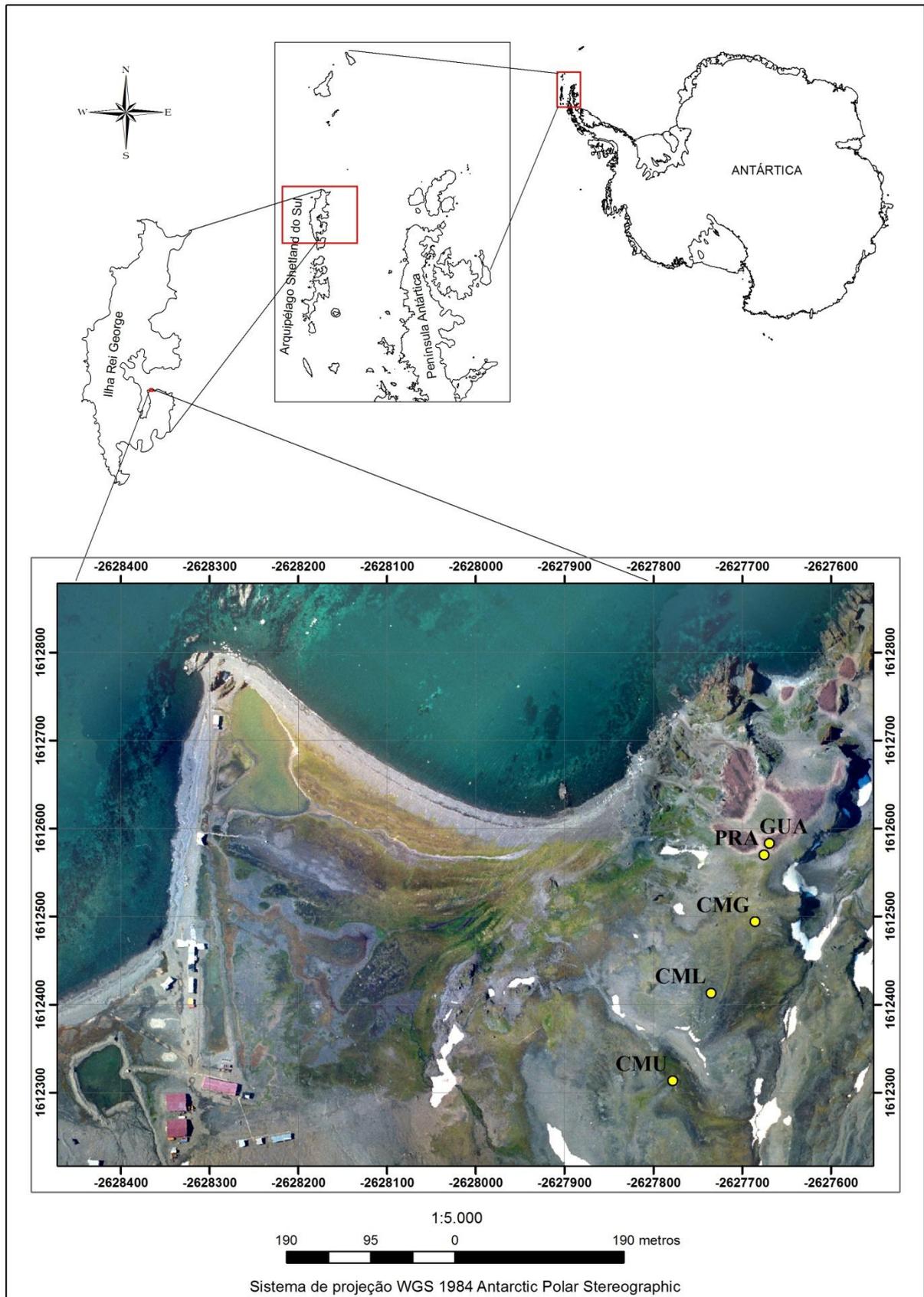


Figura 8: Localização dos diferentes ambientes de cobertura do solo, Antártica marítima.



a) Cobertura mista de gramíneas (CMG).



b) Cobertura mista de líquens (CML).



c) Alga terrestre *Prasiola crisper*



d) Carpete de musgo (CMU).



e) Guano fresco de pinguim.



f) Microperfil no guano.



g) Colônia de pinguins.

Figura 9: Sistemas de cobertura do solo, Antártica marítima.

*/ CMU: cobertura de tapete de musgo; CML: cobertura mista de líquens, briófitas e gramíneas; CMG: cobertura mista de gramíneas e briófitas

6.2.4 Coleta de amostras

Foram coletadas 15 amostras de solo na profundidade de 0 a 10 cm nos sistemas de cobertura vegetal CMU, CML e CMG, distribuídos numa grade regular de amostragem para estudos de variabilidade espacial de atributos de Corg e BMS.

Além destes sistemas de cobertura vegetal do solo foram coletadas três amostras de solo na profundidade 0-10 cm em áreas de guano fresco de pinguim (GUA) e adjacentes a estas com o solo coberto pela alga terrestre *Prasiola crisper* (PRA), com intuito de verificar os possíveis efeitos do guano na dinâmica da biomassa microbiana e sua atividade respiratória.

6.2.5 Análises laboratoriais

Após a coleta, as amostras foram secas ao ar, destorroadas, homogeneizadas e passadas por peneira de 2,0 mm de malha (terra fina seca ao ar - TFSA) para posterior execução das análises químicas, físicas e biológicas. Em cada amostra, determinaram-se os teores de carbono da biomassa microbiana e carbono solúvel em sulfato de potássio (K_2SO_4 0,5M). Determinou-se também as frações granulométricas (areia, silte, argila), o pH em água, bem como os atributos químicos (Corg, Ntot, Ca, Mg, Al, CTC, P e K).

O carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C) foi determinado por meio do método da fumigação-extração, proposto por VANCE et al. (1987). Os procedimentos em laboratório, instalado na Estação Antártica de Pesquisa H. Arctowski (Figura 10), seguiram o protocolo descrito por DE-POLLI & GUERRA (1999) e SILVA et al. (2007b), com a relação solo extrator 1:2,5 segundo TATE et al. (1988) e $K_c=0,33$ preconizado por SPARLING & WEST (1988), realizando fumigação com adição de clorofórmio (isento de etanol) diretamente na amostra, como descrito por BROOKES et al. (1982) e WITT et al. (2000), mantendo-as em local escuro por 24 horas, procedendo-se a extração e quantificação do carbono microbiano pelo método (WALKLEY & BLACK, 1934) modificado segundo TEDESCO et al. (1995), sem aquecimento externo em chapa.

A respiração microbiana (RBS) foi determinada de acordo com a metodologia proposta por JENKINSON & POWLSON, 1976, mediante a quantificação da evolução de CO_2 . A respiração específica ou quociente metabólico (índice qCO_2) foi determinado de acordo com ANDERSON & DOMSCH (1990). A análise da respiração microbiana foi determinada no laboratório, com temperatura controlada de 19 °C (RBS_19 °C) e no campo, com a temperatura variando na faixa de -1 a 3 °C (RBS_3 °C).

A análise granulométrica (areia, silte e argila) e a quantificação do Corg, Ntot, Ca, Mg, P, K, Al e pH em água foi realizada segundo EMBRAPA (1997).



Figura 10: Laboratório móvel instalado na Estação Antártica de Pesquisa H. Arctowski, Antártica marítima.

6.2.6 Emissões de CO₂ do solo

O monitoramento das taxas das emissões de CO₂ do solo foi realizado através do sistema automatizado LI-8100 (Licor), acoplado a colares de PVC instalados em cada ponto de amostragem (Figura 11). Foram realizadas quatro épocas de medição nos diferentes sistemas de cobertura do solo (CMU, CML, CMG, PRA e GUA) e em área de solo exposto (sem vegetação), com três repetições aplicados em cada ponto de amostragem, totalizando 612 medições dos fluxos de CO₂. O horário de amostragem das medições foi fixado no intervalo de 15:00 às 17:00 horas pelo horário de Brasília-BR .

A área de solo exposto foi selecionada nas redondezas dos ambientes estudados (CMU, CML, CMG, PRA e GUA), com o intuito de verificar o incremento na emissão de CO₂ de cada ambiente em relação ao solo nú (solo sem vegetação e sem influência de guano).

O sistema LI-8100 é baseado na espectroscopia de absorção infravermelho para analisar as mudanças de concentração de CO₂ no interior da câmara em um determinado intervalo de tempo. A câmara é um sistema fechado (volume interno = 854 cm³), com uma área de contato para o solo de 83 cm², programado para medir as alterações na concentração de CO₂ no interior da câmara durante 1 minuto e 30 segundos por medição.



Figura 11: Sistema automatizado LI-8100 (Licor) acoplado a colares de PVC instalados em cada ponto de amostragem, Antártica marítima.

6.2.7 Monitoramento térmico-hídrico do solo e da temperatura do ar.

Para o monitoramento térmico-hídrico do solo e da temperatura do ar foram instaladas grades de amostragens nas áreas CMU, CML e CMG, com dispositivos do tipo *datalogger*, modelo Campbell CR1000, equipados cada um com sete sensores de temperatura do solo, modelo tipo E (type E), 15 de umidade do solo, modelo CS616-L, e um de temperatura do ar, modelo 107 Temperature Probe, todos da Campbell Scientific. Cada grade foi composta por 15 pontos georreferenciados no sistema UTM, Datum WGS 84, com precisão sub métrica (GPS – Geodésico/Leica) e espaçamento de 3 m (Figura 12). Nesta grade foi conduzido o experimento de variabilidade espacial de atributos de BMS e emissões de C-CO₂.

6.2.8 Variabilidade espacial dos atributos de Corg, BMS e emissões de CO₂ do solo

Um estudo de caso foi realizado com a ferramenta geoestatística para verificar o nível de dependência espacial de atributos de BMS em diferentes coberturas vegetais do solo na Tundra Antártica, com o intuito de reconhecer o seu padrão de variabilidade espacial.

Para o estudo da variabilidade espacial instalou-se grades regulares de 72 m² (6x12m) nas áreas CMU, CML e CMG. Cada grade foi composta por 15 pontos georreferenciados no sistema UTM, Datum WGS 84, com precisão sub métrica (GPS – Geodésico/Leica) e espaçamento de 3 m (Figura 12). Em cada ponto da grade foi medido o fluxo de C-CO₂ através do sistema LI-8100 (Licor) e foram coletadas amostras deformadas na profundidade de 0-10 cm para posterior análise dos atributos químicos, físicos e de BMS.

A avaliação da dependência espacial foi realizada através do software GEOESTAT (VIEIRA et al., 1983). Esta etapa compreendeu o cálculo dos semivariogramas experimentais, validação cruzada (Jackknife) dos modelos ajustados e krigagem ordinária.

Os mapas de variabilidade espacial da biomassa microbiana e carbono do solo foram gerados por krigagem ordinária e estes cobriram uma área equivalente a 72 m². O arquivo krigado gerado através do GEOESTAT foi exportado para o programa SURFER 7.02 (GOLDEN SOFTWARE, 2000) para melhor representação e visualização dos mapas de variabilidade dos atributos.

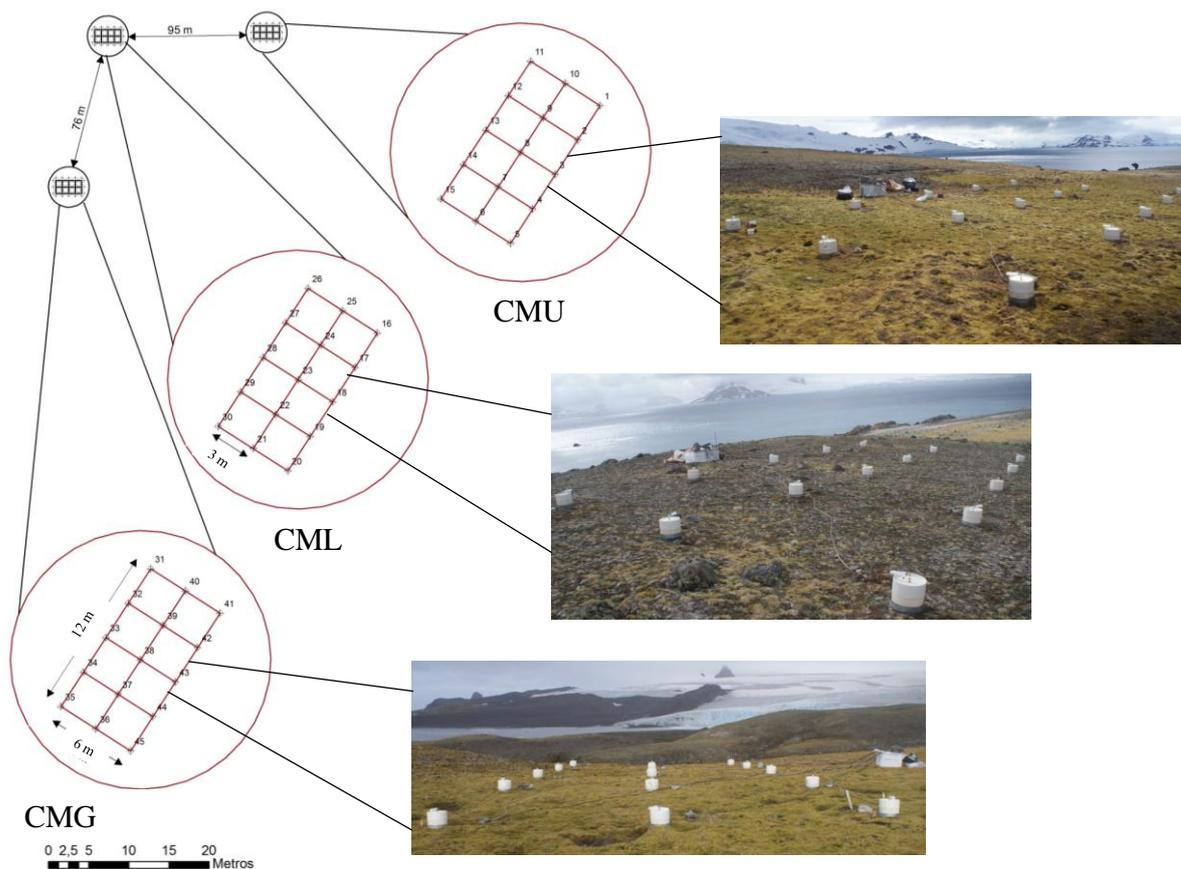


Figura 12: Grade regular de amostragem, Antártica marítima.

CMU: cobertura de carpete de musgo; CML: cobertura mista de líquens, briófitas e gramíneas; CMG: cobertura mista de gramínea e musgo com predominância da *Deschampsia antarctica* Desv. (Poaceae).

6.2.9 Análise estatística descritiva e multivariada

Inicialmente foi feita a análise estatística descritiva para avaliação do padrão de distribuição de frequência dos dados, detecção de valores anômalos, bem como de correlação de Pearson, através do software XLSTAT 7.5 (ADINSOFT, 2004).

A análise de componentes principais (ACP) foi feita com o intuito de auxiliar a interpretação da relação entre os atributos químicos, granulométricos (areia, silte e argila) e de BMS de solos sob diferentes coberturas de Tundra da Antártica. Assim, as amostras ou ambientes (CMU, CML, CMG, PRA e GUA) e as variáveis (atributos de BMS, químicos e granulométricos do solo) foram transformadas em coordenadas que correspondem à sua projeção nos eixos de ordenação, ou autovetores, representando o peso de cada variável sobre cada componente (eixo) e funcionando como coeficiente de correlação. A análise de componentes principais (ACP) foi feita utilizando os programas XLSTAT 7.5 (ADINSOFT, 2004) e CANOCO 4.5 (TER BRAAK & SMILAUER, 2002).

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1 Análise descritiva

Na Tabela 10 são apresentados os resultados de carbono da biomassa microbiana (BMS-C), atividade respiratória (RBS) e o fluxo de C-CO₂ dos diferentes tipos de cobertura do solo. Os valores médios de BMS-C nos solos com coberturas microfíticas de líquens, algas, briófitas e plantas superiores da Tundra Antártica, variaram em torno de 138 a 364 mg C kg⁻¹ solo, com os maiores valores associados as áreas cobertas por líquens, briófitas e gramíneas (CML e CMG) e os menores na área de CMU. Valores discrepantes de BMS-C (3486 mg C kg⁻¹ solo) e RBS (1,6 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹) foram observados na área de guano, contribuindo com as maiores emissões de CO₂ (42,9 μmol m⁻² s⁻¹). O quociente microbiano (CM:CO) indica que 7 a 8 % do total de Corg na camada superficial (0 a 10 cm de profundidade) do solo com guano está estocado na BMS, mostrando a magnitude que o compartimento microbiano representa no estoque de carbono do solo (Tabela 10).

Durante o período reprodutivo em que ocupam as áreas terrestres expostas, os pinguins chegam a depositar 10 kg de guano (matéria seca) por metro quadrado, afetando a área diretamente ocupada e adjacências (TATUR & MYRCHA, 1984). O guano é enriquecido por microrganismos presentes no trato digestivo dos pinguins (PIETR et al., 1983), e como a deposição é contínua (todo ano deposita) e ocorre durante o verão (temperaturas mais altas), os valores discrepantes de BMS e RBS são justificados (Tabela 10).

TSCHERKO et al. (2003) estudando transectos de solo nas proximidades da geleira *Ecology* na Estação Antártica Arctowski, também encontraram maiores valores de BMS-C e RBS em áreas de colônias de pinguins. Os valores de BMS-C encontrados por estes autores foram aproximadamente 750 mg C kg⁻¹ solo nas áreas de colônias de pinguins e 2000 mg C kg⁻¹ solo nas áreas de excrementos de outras aves marinhas.

Apesar da área de alga *Prasiola crista* (PRA) estar adjacente à colônia de pinguins, com constante influência de guano no sistema, foi observado baixo teor de Corg, BMS-C e RBS (Tabelas 10 e 11). Esta área apresenta solo exposto e pedregoso com uma cobertura de alga bem delgada, formando um biofilme sobre o solo, desfavorável ao incremento de carbono pela BMS devido à baixa produtividade primária da PRA. Além disso, os menores teores de Corg e o menor pH do solo e/ou a maior concentração de Al³⁺ da área PRA, podem limitar o crescimento e desenvolvimento microbiano (Tabela 11).

Outra hipótese deve-se ao fato de que a matéria orgânica como o guano sofre rápida taxa de decomposição devido a alta concentração e atividade de microrganismos heterotróficos (MYRCHA & TATUR, 1991), acarretando em altas perdas de C e N num curto intervalo de tempo (Tabela 11), o qual limita a quantidade de substrato disponível para uso pela BMS. Estudos confirmam que 50 % do C e N presentes na matéria orgânica como guano fresco de pinguim foi perdido para a atmosfera durante três semanas, como resultado dos processos de mineralização (PIETR et al., 1983).

ROSER et al., (1993) estudando o tamanho da população e estrutura da microbiota de solos ornitogênicos, afirmam que, a área coberta por algas diferiu da área de colônia ativa de pinguins por apresentar baixo pH, baixo conteúdo de MOS e menor teor de BMS-C, corroborando com os dados do nosso trabalho. De acordo com estes autores, a concentração de BMS-C em colônias ativas e extintas e em solos com crescimento de algas visíveis, foram de 1200, 180 e 440 mg C kg⁻¹ solo, respectivamente. Teores de BMS-C na região de Tundra do Ártico foram ainda mais altos, variando na faixa de 2990 a 13900 mg C kg⁻¹ solo (CHENG & VIRGINIA, 1993).

O teor de Corg na área de guano foi de 45 g kg⁻¹ (Tabela 11), acima dos teores observados por TSCHERKO et al. (2003), que encontraram valores de Corg variando de 5 a 20

g kg⁻¹ em área de guano de pinguins próximo ao local do presente estudo. Maiores teores de carbono orgânico foram relatados por outros estudos em solos ornitogênicos da Antártica, com valores variando entre 220 a 300 g kg⁻¹ (TATUR, 1989; UGOLINI, 1972; SPEIR & COWLING 1984).

Os níveis de N_{tot} diminuíram à medida em que os pontos amostrados se distanciavam do centro das colônias de pinguins (Tabela 11), assim como observado por HOFSTEE et al. (2006). Isso ocorre, pois segundo UGOLINI (1972) o nitrogênio destas áreas origina-se da dieta rica em proteínas dos pinguins que afetam as áreas ocupadas e adjacentes. Isto influenciou a relação C/N, com maior valor na área CMU por ser a área mais distante das colônias de pinguins (Tabela 11).

Baixa relação C/N foi observada nas áreas com influência de guano (PRA e GUA). Valores da relação C/N próximos de 2 também foram encontrados em solos afetados por guano de pinguins na Antártica (HOFSTEE et al., 2006; ZDANOWSKI et al., 2005). Os estudos de CAMPBELL & CLARIDGE (1987) e BEYER et al. (1999), mostram que os solos ornitogênicos (com influência de atividade de aves marinhas) são caracterizados por relação C/N igual ou menor do que 5. Esta baixa relação C/N é devido a alta concentração de nitrogênio presente na matéria orgânica do guano, com cerca de 37,6 % de N (MYRCHA & TATUR, 1991).

Tabela 10: Atributos de biomassa microbiana e fluxo de C-CO₂ do solo sob diferentes ambientes, Antártica marítima.

Ambiente	BMSC ... mg C kg ⁻¹ solo ...	Csol	CM:CO %	RBS_3 °C mgC-CO ₂ kg ⁻¹ solo h ⁻¹	RBS_19 °C	qCO ₂ _3 °C ... mg C-CO ₂ g ⁻¹ BM h ⁻¹ ...	qCO ₂ _19 °C	C-CO ₂ μmol m ⁻² s ⁻¹	Ug %
CMU	135,7 (±16)	68,2 (±8)	0,6 (±0,1)	0,08 (±0,02)	0,8 (±0,1)	0,8 (±0,2)	8,2 (±0,8)	2,2 (±0,1)	27,9 (±3,7)
CML	364,4 (±39)	63,5 (±2)	1,3 (±0,1)	0,3 (±0,04)	0,8 (±0,04)	1,6 (±0,5)	4,5 (±1,7)	2,1 (±0,1)	26,3 (±1,4)
CMG	326,8 (±44)	134,3 (±11)	0,9 (±0,1)	0,08 (±0,03)	0,4 (±0,09)	0,2 (±0,04)	1,3 (±0,08)	3,7 (±0,3)	37,3 (±2,7)
PRA	148,9 (±19)	75,2 (±8)	1,5 (±0,1)	0,08 (±0,02)	0,6 (±0,16)	0,5 (±0,1)	3,3 (±0,7)	3,6 (±0,2)	22,1 (±2,6)
GUA	3486 (±793)	171,3 (±27)	7,8 (±2)	1,6 (±0,2)	2,9 (±0,5)	0,5 (±0,2)	1 (±0,3)	42,9 (±5,5)	25,4 (±2,8)

Valor entre parênteses corresponde ao erro padrão da média. CMU: cobertura de musgo; CML: cobertura mista de líquens, briófitas e gramíneas; CMG: cobertura mista de gramíneas e musgo; PRA: alga *Prasiola crispera*; GUA: guano fresco de pinguim. BMSC: carbono da biomassa microbiana do solo; Csol: carbono solúvel; CM:CO: quociente microbiano; RBS_3 °C e RBS_19 °C : respiração microbiana do solo na temperatura média de 3 °C e 19 °C, respectivamente; qCO₂_3 °C e qCO₂_19 °C: quociente metabólico calculado com a RBS_3 °C e RBS_19 °C, respectivamente.

Tabela 11: Atributos químicos e granulométricos (areia, silte e argila) do solo sob diferentes ambientes, Antártica marítima.

Ambiente	Corg g kg ⁻¹	Ntot	C/N	pH água 1:2,5	Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	Ca	Mg	P mg dm ⁻³	K	CTC cmol _c dm ⁻³	Areia %	Silte	Argila
CMU	22,4 (±2)	1,9 (±0,2)	12,1 (±0,8)	4,7 (±0)	4,3 (±0,2)	1,8 (±0,2)	1,3 (±0,2)	386 (±59)	141 (±4,9)	18,3 (±0,5)	89,3 (±0,4)	8,1 (±0,5)	2,7 (±0,5)
CML	29,1 (±3)	3,4 (±0,2)	8,3 (±0,5)	5 (±0,1)	2,8 (±0,3)	4,7 (±0,3)	3,4 (±0,2)	1619 (±75)	331 (±26)	32,2 (±0,9)	75,9 (±0,7)	17,1 (±0,9)	7 (±0,8)
CMG	38,7 (±7)	5,3 (±0,3)	7,1 (±0,8)	4,4 (±0)	3,4 (±0,2)	2,1 (±0,3)	1,5 (±0,2)	1326 (±75)	130 (±9)	26,4 (±0,4)	74,6 (±1,4)	13,8 (±0,8)	11,6 (±0,9)
PRA	10,2 (±2,1)	6,9 (±1)	1,5 (±0,1)	3,8 (±0,1)	9,8 (±2,1)	4,1 (±0,7)	3,6 (±1)	550 (±111)	443 (±33)	35,8 (±1,6)	48,3 (±0,9)	35,7 (±1,8)	16 (±1)
GUA	45,3 (±1,2)	17,4 (±1,3)	2,6 (±0,1)	7 (±0,1)	0 (±0)	1,1 (±0,1)	5,4 (±0,3)	763 (±369)	1204 (±130)	20,4 (±1,8)	64,7 (±1,8)	19,7 (±1,7)	15,7 (±1,2)

Valor entre parênteses corresponde ao erro padrão da média. CMU: cobertura de musgo; CML: cobertura mista de líquens, briófitas e gramíneas; CMG: cobertura mista de gramíneas e musgo; PRA: alga *Prasiola crispera*; GUA: guano fresco de pinguim.

Dentre os ambientes com vegetação mais desenvolvida (CMU, CML e CMG), o conteúdo médio de Corg, Ntot e BMS-C aumentou com o estágio sucessional, ou seja, da área mais recente de recuo de geleira (CMU) para a mais antiga (CMG; Tabela 10). BEKKU et al., (1999), estudando a BMS em diferentes estágios sucessionais em áreas de recuo de geleiras no Ártico, observaram que os valores de BMS-C estava associado a idade da sucessão primária do recuo da geleira, onde as áreas mais antigas da sucessão, com quase toda superfície do solo coberta por crostas de algas, líquens, musgos e plantas vasculares, apresentaram os maiores valores de BMS, em torno de 1030 mg C kg⁻¹ solo, e as áreas mais novas situadas ao pé da geleira, com pouca cobertura vegetal do solo, apresentou valores em torno de 60 mg C kg⁻¹ solo.

Além do fato da CMU ser a área mais nova da sucessão primária do recuo da geleira, a alta saturação de água no solo, constatado visualmente pelas condições de encharcamento, limita o crescimento dos microrganismos aeróbios e conseqüentemente, o acúmulo de carbono pela BMS (Tabela 10).

Na área CML os valores mais altos de BMS-C e da taxa de RBS é atribuído ao maior número de espécies vegetais por metro quadrado, o qual oferta matéria orgânica com diferentes graus de suscetibilidade à decomposição. A partir do momento que a *Deschampsia Antarctica* (CMG) passa a dominar áreas vizinhas a CML, o teor de Corg e Ntot aumenta, o valor de BMS-C se mantém o mesmo e a respiração microbiana (RBS) diminui, indicando um novo estágio metabólico da BMS com alta eficiência no uso de C do solo, constatado pelo menor quociente metabólico na área CMG (Tabelas 10 e 11).

As gramíneas com sistema radicular bem desenvolvido e concentrado nos primeiros 10 cm de profundidade do solo aumentam a entrada de carbono no solo via rizosfera devido à renovação do sistema radicular e da parte aérea, que atuam na ativação da microbiota do solo (CARNEIRO et al., 2008). Segundo SANTANA (2006), a associação do solo com algum tipo de cobertura vegetal, como briófitas ou *Deschampsia Antarctica*, possibilita a formação de um microclima com temperaturas mais adequadas para o desenvolvimento e atividade metabólica dos microrganismos do solo.

A RBS variou de acordo com a temperatura, sendo máxima a 19 °C, devendo-se considerar as condições climáticas locais durante a sua análise, evitando desta forma superestimativas ou subestimativas da sua atividade. As comunidades microbianas mais sensíveis ao aumento da temperatura foram as associadas a área CMU. Nota-se que com o aumento da temperatura média de 3 para 19 °C, a área de CMU passou a apresentar alto valor de RBS, com um aumento relativo de 10 vezes (Tabela 10). Isso provavelmente ocorreu devido à mudanças ocorridas na manipulação das amostras no laboratório, onde os microrganismos adaptados às baixas temperaturas e às condições de anaerobiose, devido ao encharcamento de água no solo, passam a condição de alta temperatura e maior oxigenação, induzindo um estresse e aumento da atividade metabólica dos microrganismos aeróbios. BOLTER (1989) afirma que, as temperaturas mais elevadas podem aumentar drasticamente a taxa metabólica dos microrganismos, apontando para o fato de que a temperatura tem que ser considerada como um importante fator controle dos processos metabólicos.

O qCO₂ calculado indica grandes diferenças entre os tipos de cobertura do solo, com menor valor na área CMG, indicando ser o ambiente com a atividade metabólica da BMS mais eficiente no uso de carbono do solo, ilustrando o seu papel na dinâmica de MOS nos ecossistemas terrestres. O qCO₂ variou de acordo com a temperatura, sendo máximo a 19 °C (Tabela 10). TSCHERKO et al. (2003) encontraram valores ainda mais altos de RBS e qCO₂ em áreas de recuo de geleiras nas proximidades do glaciar Ecology na Antártica marítima. Porém o método utilizado para determinação da respiração microbiana foi o proposto por ISERMEYER (1952) com temperatura de incubação de 25 °C, descaracterizando as condições climáticas locais e repercutindo na alta atividade microbiana.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados da análise de correlação linear de Pearson entre os atributos estudados. A análise de correlação mostrou muitas inter-relações entre os atributos, sendo que o aumento do teor de Corg e Ntot, através do aporte de MOS das diferentes comunidades vegetais e das colônias de pingüins, promoveu o maior teor de BMS-C. Este aumento da BMS-C repercutiu no aumento da relação CM:CO, RBS e emissões de C-CO₂ (Tabela 12). BEKKU et al., (1999) estudando solos do ártico, também encontraram correlação positiva entre o carbono do solo e a biomassa microbiana.

Tabela 12: Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre os atributos estudados, Antártica marítima.

	BMSC	Csol	CM:CO	RBS_3gr	qCO2_3gr	C-CO2	pH	Al	Corg	Ntot	CN	P	K	Ca	Mg	CTC	Areia	Silte	Argila	Ug	
BMSC	1,0																				
Csol	0,5	1,0																			
CM:CO	1,0	0,5	1,0																		
RBS_3gr	0,8	0,3	0,8	1,0																	
qCO2_3gr	-0,1	-0,4	-0,1	0,1	1,0																
C-CO2	1,0	0,5	1,0	0,9	-0,1	1,0															
pH	0,8	0,3	0,8	0,9	0,0	0,9	1,0														
Al	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	0,1	-0,5	-0,7	1,0													
Corg	0,3	0,5	0,2	0,2	-0,2	0,3	0,2	-0,5	1,0												
Ntot	0,8	0,6	0,8	0,8	-0,2	0,9	0,7	-0,4	0,4	1,0											
CN	-0,4	-0,4	-0,5	-0,4	0,1	-0,4	-0,2	-0,1	0,2	-0,6	1,0										
P	0,0	0,3	0,0	-0,1	0,2	-0,1	0,0	-0,3	0,2	-0,1	-0,1	1,0									
K	0,9	0,3	0,9	0,9	0,2	0,9	0,8	-0,3	0,1	0,8	-0,5	0,0	1,0								
Ca	-0,3	-0,4	-0,2	-0,2	0,2	-0,4	-0,2	0,0	0,0	-0,2	0,1	0,4	-0,1	1,0							
Mg	0,6	0,0	0,6	0,7	0,0	0,6	0,6	-0,2	0,2	0,6	-0,4	0,0	0,7	0,4	1,0						
CTC	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	0,3	-0,3	-0,3	0,3	-0,1	-0,1	-0,3	0,6	0,1	0,7	0,2	1,0					
Areia	-0,3	-0,4	-0,3	-0,3	0,1	-0,3	0,0	-0,3	0,0	-0,6	0,8	-0,1	-0,5	-0,1	-0,4	-0,5	1,0				
Silte	0,1	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1	-0,2	0,4	-0,1	0,4	-0,7	0,1	0,3	0,3	0,3	0,7	-0,9	1,0			
Argila	0,4	0,7	0,4	0,3	-0,3	0,5	0,1	0,0	0,3	0,7	-0,7	0,1	0,4	-0,2	0,3	0,2	-0,8	0,7	1,0		
Ug	0,1	0,6	-0,1	-0,1	-0,2	0,0	-0,1	-0,3	0,8	0,2	0,1	0,3	-0,2	0,0	-0,1	0,1	-0,1	0,1	0,4	1,0	

Valores em negrito são significativos no nível de 5%.

6.3.2 Emissões de C-CO₂ e variação térmica do solo

A Figura 13 representa a variação da temperatura média do ar e das taxas médias das emissões de C-CO₂ do solo mensuradas “in situ”, ou seja, considerando a atividade respiratória dos microrganismos, dos macrorganismos (colêmbolas, ácaros...) e das plantas, durante o mês de fevereiro de 2012 na Antártica marítima.

A temperatura do ar variou de 0 a 8,5 °C, com média de 4,5 °C, considerando a variação térmica no intervalo de coleta (15:00 às 17:00 hs) das emissões de C-CO₂ do solo (Figura 13). As emissões de C-CO₂ nos diferentes ambientes de cobertura do solo variaram de 0,2 a 56 μmol m⁻² s⁻¹ (Figura 13). A área de guano apresentou os maiores fluxos de C-CO₂ do solo, com os valores oscilando de 25 a 56 μmol m⁻² s⁻¹, com taxa de emissão de aproximadamente 100 vezes a mais em relação à área de solo exposto (Figura 13). ORCHARD & CORDEROY (1983), também encontraram alta taxa de emissão de C-CO₂ em solos ornitogênicos da Antártica.

Dentre os ambientes com vegetação mais desenvolvida, a área CMG foi a que mais contribuiu com as emissões de C-CO₂, com um fluxo médio de 3,7 μmol m⁻² s⁻¹, aproximadamente nove vezes a mais em relação à área de solo exposto (Figura 14). O fato da área CMG ser dominada por uma espécie de planta vascular (*Deschampsia Antarctica*), com sistema radicular mais desenvolvido, justifica um fluxo de C-CO₂ mais alto quando comparado aos ambientes dominados por plantas inferiores. MENDONÇA et al., (2011), estudando emissões de C-CO₂ de solos ornitogênicos sob cobertura vegetal de *Deschampsia Antarctica* na Estação Polonesa H. Arctowski, observaram valor médio do fluxo de C-CO₂ em torno de 4 μmol m⁻² s⁻¹, similar ao encontrado no presente trabalho. PARK et al. (2007), utilizando regressão linear múltipla revelou que a respiração e a produção primária foram melhor predita por biomassa de *Deschampsia Antarctica*, sugerindo uma contribuição desproporcional de *Deschampsia Antarctica* nos fluxos de C-CO₂.

Os dados mostram que o aporte de guano no sistema e o desenvolvimento das comunidades vegetais aumentam consideravelmente as emissões de C-CO₂ do solo com relação a área de solo exposto (Figura 13).

Na Figura 14 são apresentadas as emissões de C-CO₂ e a temperatura média do solo nos ambientes com cobertura vegetal. A temperatura do solo variou de 1,3 a 4,8 °C, com os maiores valores observados na área CML e os menores na CMG. O desenvolvimento foliar e o sistema radicular denso das gramíneas, concentrado nas camadas superficiais do solo, formam um manto superficial com efeito de “isolamento térmico” ar – solo, com menor entrada de radiação solar no solo, devido à maior absorção da energia radiante pelas folhas, promovendo menores valores de temperatura do solo na área CMG.

As emissões de C-CO₂ não apresentaram correlação com a temperatura do ar e do solo, estando neste estudo, mais relacionadas ao tipo de cobertura do solo.

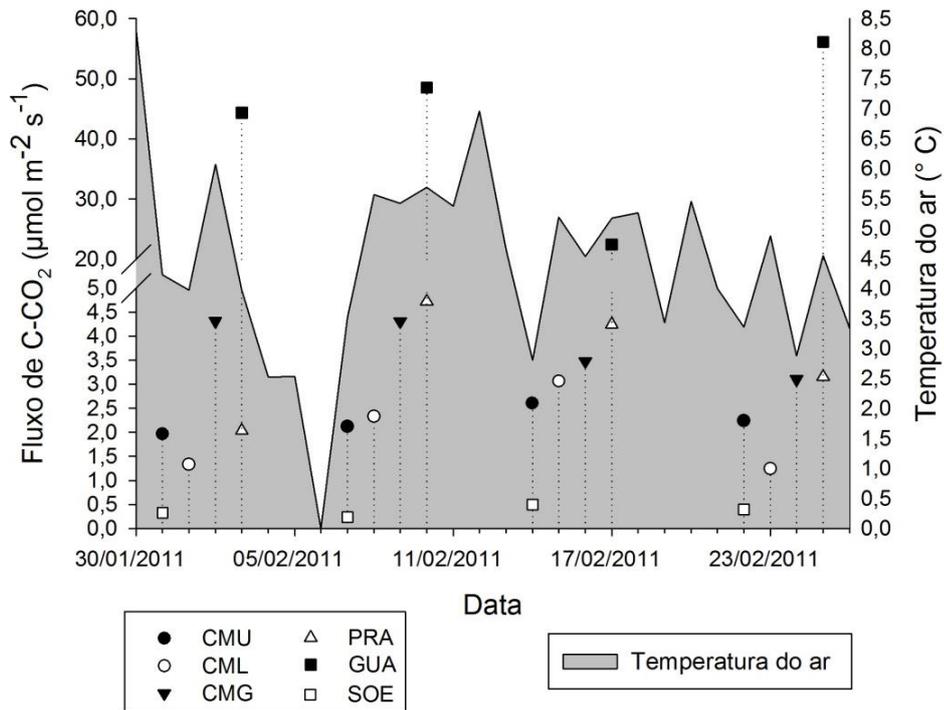


Figura 13: Fluxo de C-CO₂ (µmol m⁻² s⁻¹) e temperatura média do ar (°C) sob diferentes ambientes durante o mês de fevereiro de 2011, Antártica marítima. CMU: cobertura de musgo; CML: cobertura mista de líquens, briófitas e gramíneas; CMG: cobertura mista de gramíneas e musgo; PRA: alga *Prasiola crispata*; GUA: guano fresco de pinguim; SOE: solo exposto.

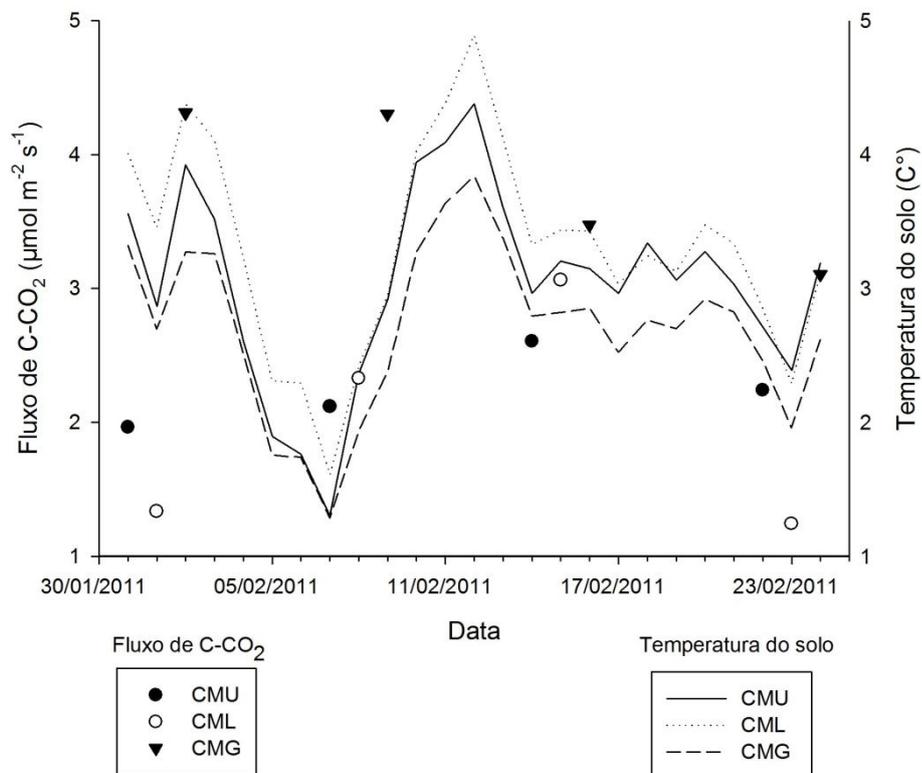


Figura 14: Fluxo de C-CO₂ e temperatura do solo nas diferentes coberturas vegetais do solo durante o mês de fevereiro de 2011, Antártica marítima. CMU: cobertura de musgo; CML: cobertura mista de líquens, briófitas e gramíneas; CMG: cobertura mista de gramíneas e musgo.

6.3.3 Análise de Componentes Principais

A Tabela 13 mostra os valores de variância, a contribuição da variável e a contribuição do ambiente de cada componente principal. A ACP permitiu resumir o conjunto das 20 variáveis originais em 4 componentes principais. Os dois primeiros componentes principais explicaram 76 % da variância total dos dados. Deste percentual, o componente principal 1 (F1) explicou 52 % da variabilidade do conjunto dos dados. As variáveis com maior capacidade discriminatória no processo de formação dos agrupamentos pelo componente principal 1 (F1), foram o Ntot (9,4 %), a relação CM:CO (9,3 %), a BMS-C (9,2) e a emissão de C-CO₂ (9,1 %). No componente principal 2 (F2), foram a quantidade de silte (19,6 %), areia (16,6 %), a CTC (14 %) e a relação C/N (11 %). A associação entre essas variáveis e os componentes principais (F1 e F2) caracterizou a dependência dos atributos de BMS (BMS-C e CM:CO) e das emissões de C-CO₂ pelos teores de Ntot, o qual foi influenciado pela textura e a relação C/N do solo.

A área de guano de pinguins (GUA) foi o ambiente que mais contribuiu para o componente principal 1 (F1) identificar os padrões de agrupamento do conjunto de dados (Tabela 13), mostrando-se a área mais discrepante com relação as variáveis estudadas.

Tabela 13: Autovalor, variância, contribuição da variável e contribuição do ambiente dos quatros componentes principais, Antártica marítima.

	F1	F2	F3	F4
Autovalor	10,3	4,9	2,7	2,1
Variância (%)	51,7	24,6	13,3	10,4
Variância acumulada (%)	51,7	76,3	89,6	100,0
Contribuição da variável (%)	F1	F2	F3	F4
BMSC	9,2	0,7	0,1	0,8
Csol	7,8	0,0	1,1	8,0
CM:CO	9,3	0,1	0,4	1,4
RBS	8,8	0,7	0,0	2,9
qCO ₂	1,4	1,1	4,5	33,1
C-CO ₂	9,1	0,6	0,7	0,6
pH	7,7	3,0	0,3	2,6
Al	3,8	8,0	7,8	0,1
Corg	5,2	2,2	10,2	4,0
Ntot	9,4	0,3	0,3	0,0
CN	4,3	11,0	0,3	0,1
P	0,0	0,0	37,1	0,4
K	8,3	0,1	0,4	6,1
Ca	1,4	10,3	8,0	6,2
Mg	6,8	3,5	0,2	6,0
CTC	0,7	14,0	7,3	2,1
Areia	1,5	16,6	1,1	0,0
Silte	0,3	19,6	0,3	0,0
Argila	4,5	8,1	1,3	5,0
Ug	0,6	0,4	18,8	20,5
Contribuição do ambiente (%)	F1	F2	F3	F4
CMU	18,5	33,4	27,4	0,7
CML	5,3	0,1	40,3	34,3
CMG	0,5	0,5	15,7	63,3
PRA	1,6	63,2	15,2	0,0
GUA	74,0	2,9	1,4	1,7

CMU: cobertura de musgo; CML: cobertura mista de líquens, briófitas e gramíneas; CMG: cobertura mista de gramíneas e musgo; PRA: alga *Prasiola crista*; GUA: guano fresco de pinguim. Carbono da biomassa microbiana (BMSC); carbono solúvel em K₂SO₄ (Csol); relação BMSC/Corg (CM:CO); respiração da BMS (RBS); quociente metabólico (qCO₂); fluxo de C-CO₂ (C-CO₂); Carbono orgânico (Corg); nitrogênio total (Ntot); relação Corg/Ntot (CN); Ug: umidade gravimétrica.

A Figura 15 representa graficamente a análise de componentes principais (ACP) em duas dimensões, representada pelo eixo F1 (componente principal 1) e o eixo F2 (componente principal 2). A distribuição espacial das 20 variáveis originais (atributos de BMS, químicos e granulométricos do solo) está representada por setas e a dos ambientes (CMU, CML, CMG, PRA e GUANO) por pontos.

A ACP separou os diferentes ambientes em três grupos em função da similaridade das variáveis estudadas. O primeiro grupo compreende a área de guano fresco de pinguins

(GUANO), o segundo a área coberta por alga (PRA) e o terceiro as áreas com cobertura vegetal de Tundra (CMU, CML e CMG; Figura 15).

O componente F1 mostrou que as áreas de guano se associaram a altos valores de MOS (Corg e Ntot) e atributos de BMS (BMS-C, Csol, CM:CO, RBS e emissões de C-CO₂), indicando que a maior atividade microbiana e emissões de C-CO₂ na Antártica estão associados a solos com influência de guano de colônia de pinguins. Pelo componente F2, a área PRA apresentou alta correlação com os valores de silte, CTC e Al, enquanto a área CMU apresentou maior relação C/N e maior quantidade de areia (Figura 15).

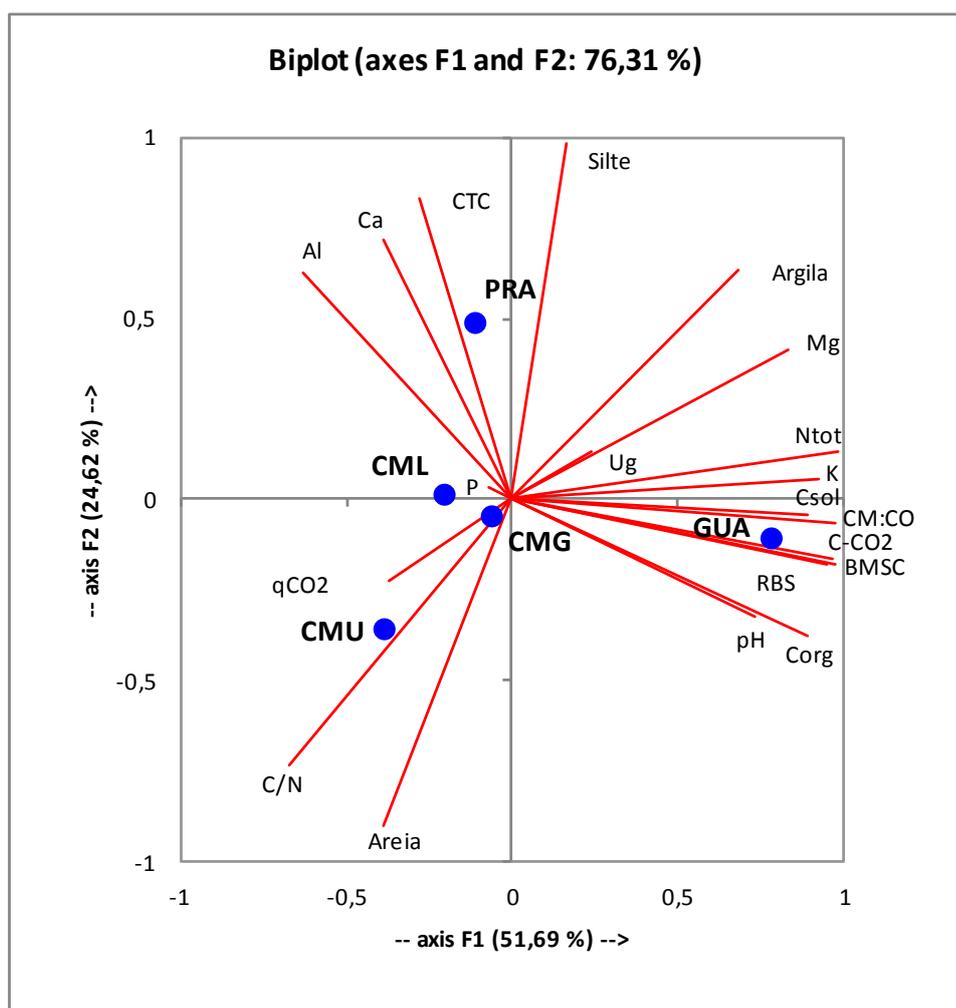


Figura 15: Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos químicos, granulométricos (areia, silte e argila) e de BMS nas diferentes coberturas do solo, Antártica marítima.

CMU: cobertura de musgo; CML: cobertura mista de líquens, briófitas e gramíneas; CMG: cobertura mista de gramíneas e briófitas; PRA: alga *Prasiola crispa*; GUA: guano fresco de pinguim. Carbono da biomassa microbiana (BMSC); carbono solúvel em K₂SO₄ (Csol); relação BMSC/Corg (CM:CO); respiração da BMS (RBS); quociente metabólico (qCO₂); fluxo de C-CO₂ (C-CO₂); Carbono orgânico (Corg); nitrogênio total (Ntot); relação Corg/Ntot (C/N); Ug: umidade gravimétrica.

6.3.4 Análise de Variabilidade Espacial

Na Tabela 14 são apresentados os semivariogramas experimentais e respectivos modelos ajustados para os atributos Corg, Csol e emissões de C-CO₂. A área de cobertura de musgo (CMU) apresentou dependência espacial para os atributos carbono orgânico (Corg) e carbono solúvel do solo (Csol), com maior r² ajustado pelo modelo esférico.

Nas áreas de cobertura mista de briófitas (CML) e cobertura mista de gramínea (CMG) os atributos que apresentaram dependência espacial foram o Csol e o fluxo de C-CO₂, sendo o modelo esférico ajustado para esses atributos, com exceção do fluxo de C-CO₂ na área de CMG, que apresentou melhor ajuste pelo modelo gaussiano, e correspondeu com o maior alcance do semivariograma (Tabela 14).

O atributo biomassa microbiana do solo não apresentou dependência espacial em nenhum dos ambientes avaliados, mostrando ser um atributo que apresenta erro ao acaso em condições naturais. LOUREIRO et al. (2010), encontrou que o manejo seletivo do solo (fator extrínseco) induz a variabilidade espacial de atributos de BMS, encontrando dependência espacial para estes atributos somente em áreas com maior atividade antrópica.

Tabela 14: Valores teóricos estimados dos semivariogramas, Antártica marítima.

Atributos	Modelo	C ₀	C ₁	Alcance (m)	r ²
CMU					
Corg	Esférico	0	92,6	8,2	0,96
Csol	Esférico	0	0,06	8,27	0,87
CML					
Csol	Esférico	0,002	0,001	8,27	0,86
C-CO ₂	Esférico	0	0,02	6,55	0,91
CMG					
Csol	Esférico	0,004	0,019	7,42	0,8
C-CO ₂	Gaussiano	0,68	1,94	15	0,96

Modelos selecionados por validação cruzada (Jack-nife); C₀= efeito pepita; C₁= patamar. Corg= carbono orgânico; Csol: carbono solúvel; C-CO₂: fluxo de C-CO₂ do solo. CMU: cobertura de musgo; CML: cobertura mista de líquens, briófitas e gramíneas; CMG: cobertura mista de gramíneas e briófitas.

Dos atributos avaliados o Csol foi o único que apresentou dependência espacial nos três sistemas de cobertura vegetal do solo (CMU, CML e CMG), sendo indicado para possíveis estudos de variabilidade espacial de atributos de MOS (Figura 16).

Com exceção do Corg e do fluxo de C-CO₂ nas áreas de CMU e CMG, respectivamente, foi necessário realizar a transformação logarítmica nos atributos para tornar possível o ajuste dos modelos aos semivariogramas.

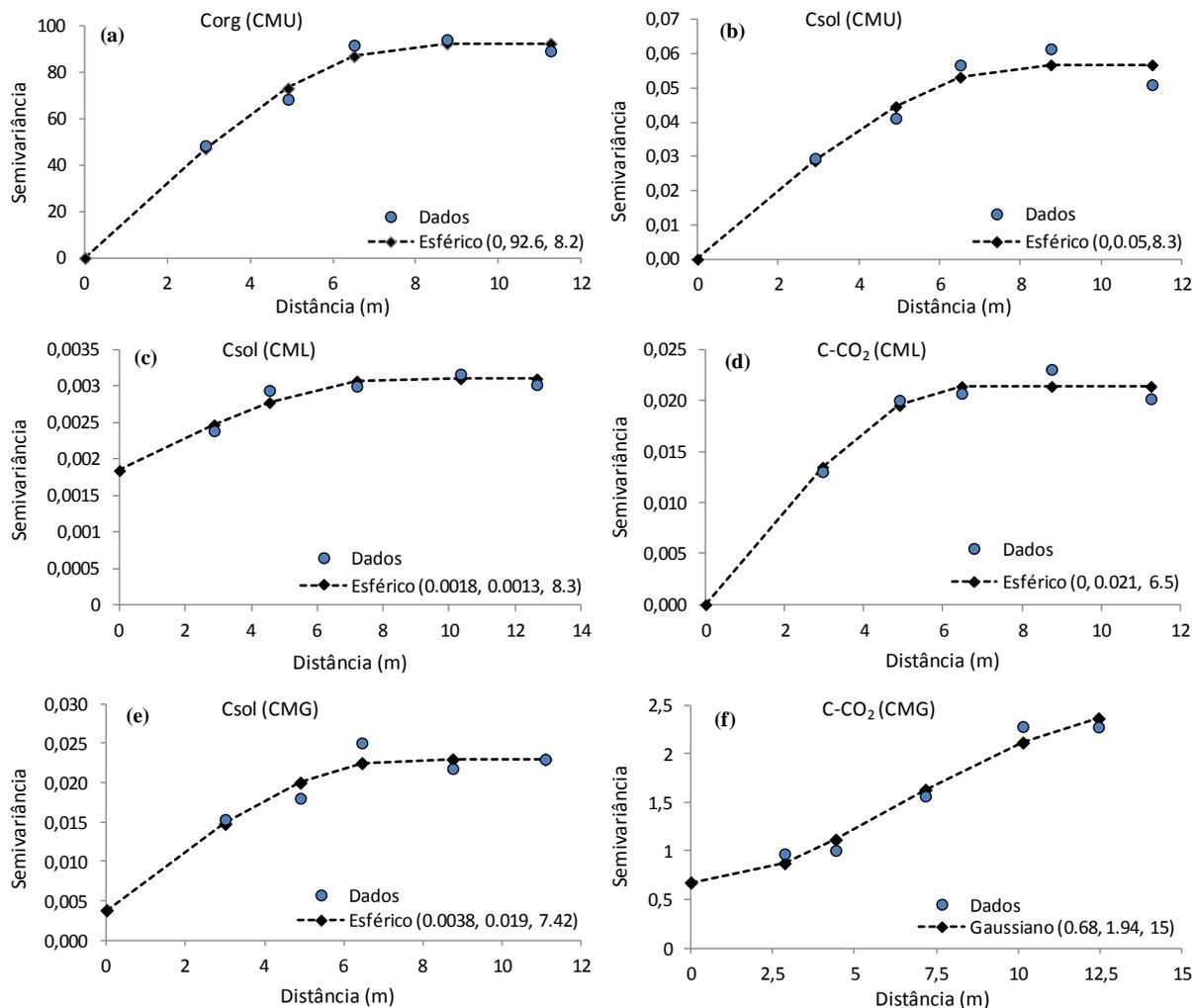


Figura 16: Semivariogramas de carbono orgânico (Corg, a) e carbono solúvel (Csol, b) na área CMU, carbono solúvel (Csol, c) e fluxo de C-CO₂ (d) na área CML, e carbono solúvel (Csol, e) e fluxo de C-CO₂ (f) na área CMG, Antártica marítima. Valores entre parênteses correspondem a efeito pepita C_0 , contribuição C_1 , e alcance do modelo ajustado, respectivamente. CMU: cobertura de musgo; CML: cobertura mista de líquens, briófitas e gramíneas; CMG: cobertura mista de gramíneas e briófitas.

Os mapas de variabilidade espacial dos atributos Corg e Csol na área de cobertura de musgo (CMU) estão apresentados nas figuras 17a e 17b, respectivamente. Através de avaliação visual, é possível constatar um padrão similar de variabilidade espacial desses atributos, ou seja, áreas com maior teor de Corg favorecem o maior teor de Csol (Figura 17). O maior teor de Corg e Csol, representado pela cor mais escura nos mapas de variabilidade espacial, ocorre devido a uma vegetação mais vigorosa nestes locais.

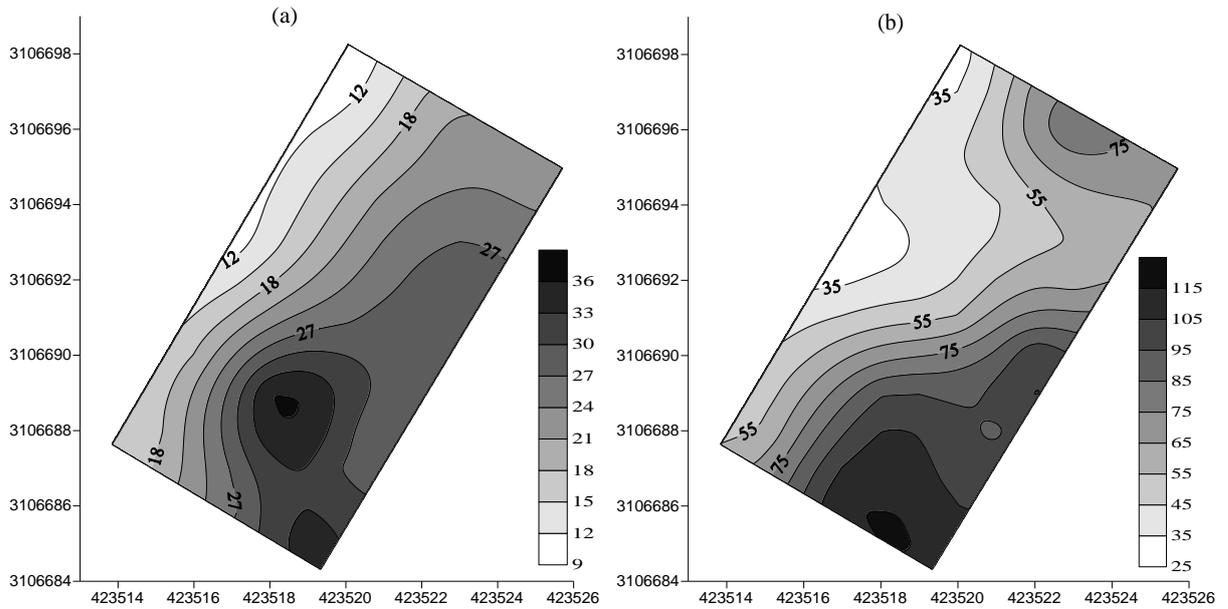


Figura 17: Mapa de variabilidade espacial de Corg (g kg⁻¹) (a) e Csol (mg C kg⁻¹ solo) (b) na área de cobertura de musgo (CMU), Antártica marítima.

As figuras 18a e 18b referem-se, respectivamente aos mapas de Csol e fluxo de C-CO₂ na área de cobertura mista de briófitas (CML). Foi constatado um padrão de variabilidade espacial inverso entre o Csol e o fluxo de C-CO₂. Este padrão é mais facilmente detectado no canto superior direito dos referidos mapas, onde locais com maior fluxo de C-CO₂ apresentam menor teor de Csol (Figura 18). De acordo com ZOU et al (2005) o carbono lábil é a fração do carbono orgânico do solo com o turnover mais rápido e que sua oxidação regula o fluxo de CO₂ entre solo e atmosfera.

A presença da gramínea *Deschampsia antarctica* nos pontos com maior fluxo de C-CO₂ (cores mais escuras do mapa) comprova a influência deste tipo de cobertura vegetal na maior emissão de C-CO₂ do solo, assim como o observado por MENDONÇA et al., (2011), que encontrou maiores emissões de C-CO₂ em solos cobertos com *Deschampsia antarctica*.

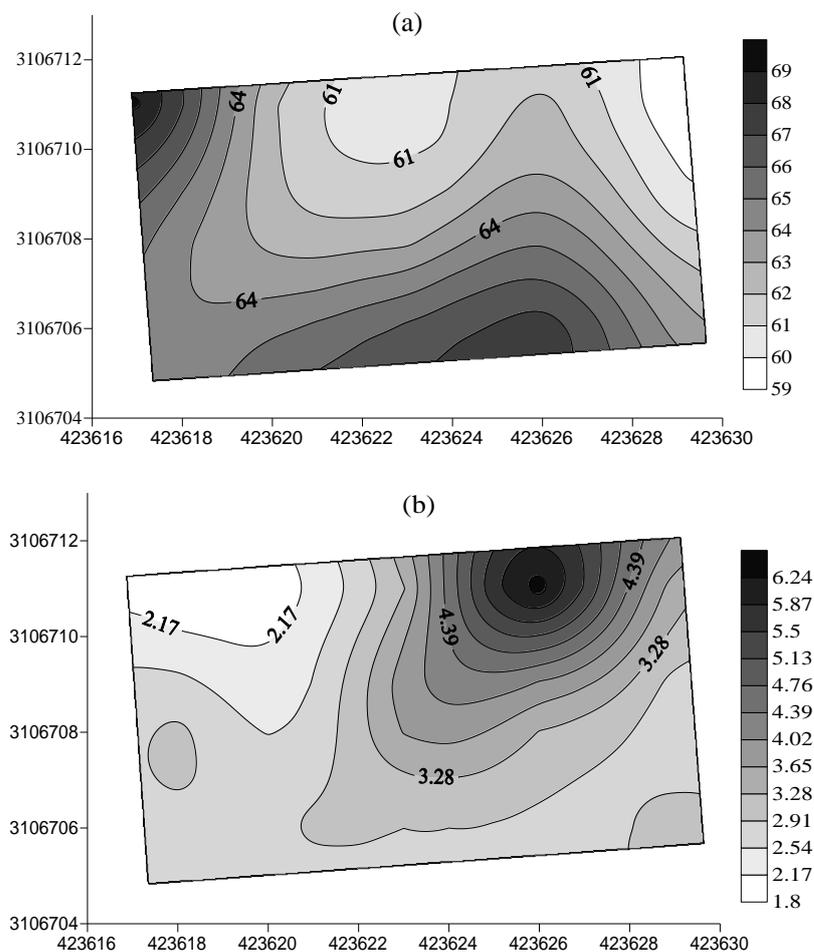


Figura 18: Mapa de variabilidade espacial de Csol (mg C kg⁻¹ solo) (a) e fluxo de C-CO₂ (µmol m⁻² s⁻¹) (b) na área de cobertura mista de líquens, briófitas e gramíneas (CML), Antártica marítima.

Com relação ao Csol na área de CMG, não foi constatado, visualmente, um padrão de variabilidade sistemático com o fluxo de C-CO₂ (Figura 19a e 19b).

O mapa de variabilidade espacial do fluxo de C-CO₂ na área CMG mostra que o local com maior emissão foi devido à proximidade dos ninhos de aves *Skuas*, demonstrando a influência da avifauna nas emissões de C-CO₂ do solo (Figura 19).

A detecção de regiões com comportamento diretamente e inversamente proporcional, como no caso de Corg com o Csol, e do Csol com o fluxo de C-CO₂, respectivamente, demonstra que a ferramenta geoestatística amplia a possibilidade de análise dos fenômenos em uma determinada área.

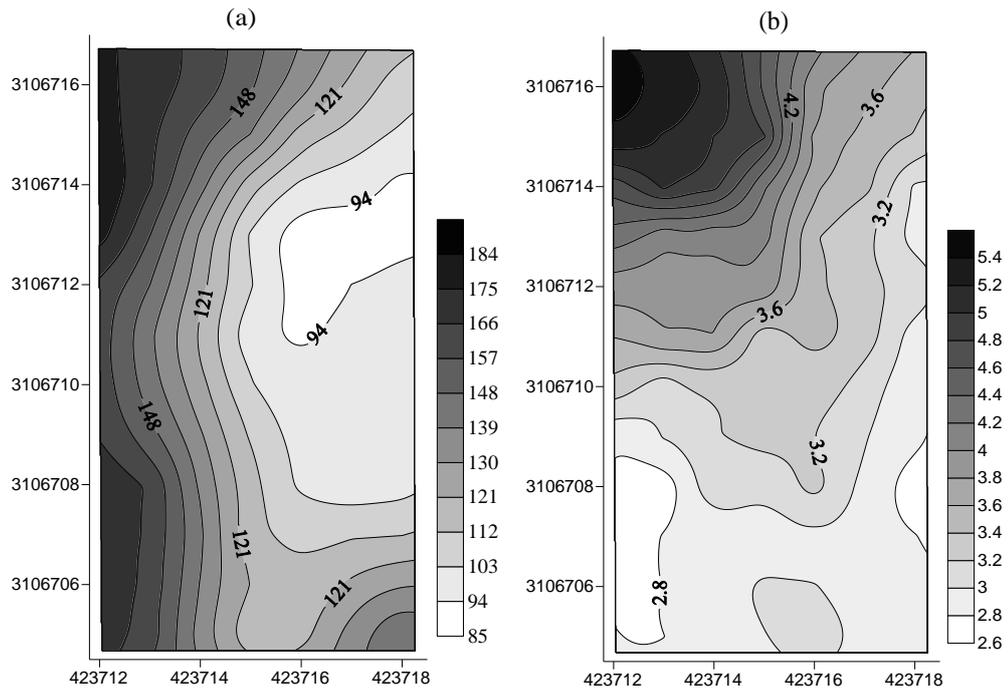


Figura 19: Mapa de variabilidade espacial de Csol (mg C kg⁻¹ solo) (a) e fluxo de C-CO₂ (µmol m⁻² s⁻¹) (b) na área de cobertura mista de gramínea (CMG), Antártica marítima.

6.4 CONCLUSÕES

Os resultados do trabalho confirmam a importância da avaliação *in situ* do funcionamento dos ecossistemas terrestres da Antártica, oferecendo novas percepções sobre o nível de emissões de carbono que podem ser esperado, sob o cenário presente de aumento da temperatura.

A temperatura mostrou ser um fator de controle nas emissões de C-CO₂ pela respiração microbiana do solo, sendo máxima a 19 °C e com um aumento relativo de até 10 vezes quando comparado à temperatura de 3 °C. Porém, quando consideramos as emissões de C-CO₂ medidas no campo (“*in situ*”), ou seja, considerando as emissões do solo, dos microrganismos, dos macrorganismos e das raízes das plantas, a temperatura mostrou não ser o fator principal no controle das emissões de C-CO₂, estando estas emissões mais relacionadas ao tipo de cobertura do solo. O quociente metabólico calculado indica que, com um provável aumento da temperatura, os ambientes mais sensíveis estão associados aos solos cobertos com musgos (CMU), indicando-os com maior grau de fragilidade ambiental.

A análise de componentes principais (ACP) simplificou estruturalmente o conjunto de dados, sendo uma ferramenta útil no estudo do inter-relacionamento entre sucessão ecológica em área de recuo de geleiras e teores de matéria orgânica do solo, levando a identificação de padrões de agrupamento do conjunto de dados. A ACP mostrou que o maior teor de BMS-C e emissões de C-CO₂ na Antártica estão associados a solos com influência de guano de colônia de pinguins, com cerca de 7 a 8 % do carbono orgânico total destes solos estocado na estrutura celular dos microrganismos, considerando a camada de 0 a 10 cm de solo.

O uso da ferramenta geoestatística permitiu conhecer o padrão de variabilidade espacial do carbono solúvel e das emissões de C-CO₂ do solo, ampliando a possibilidade de análise dos fenômenos em uma determinada área. Os atributos de biomassa microbiana não apresentaram dependência espacial, indicando erro ao acaso em todos os ambientes avaliados.

7 CONCLUSÕES GERAIS

1. As áreas cobertas com vegetações rasteiras de líquens, briófitas, algas e gramíneas na Tundra Antártica apresentaram valores médios de carbono da biomassa microbiana do solo semelhantes aos ecossistemas naturais de Florestas Tropicais Equatoriais na Amazônia e nos Remanescentes Florestais na Mata Atlântica, porém com atividade respiratória da biomassa microbiana do solo de duas a sete vezes menor do que nas florestas tropicais, devido às baixas temperaturas que retardam a atividade microbiana e a mineralização da matéria orgânica do solo. O potencial de estoque de carbono na BMS nestes ecossistemas naturais ficou entre 1 a 2 % do C orgânico total do solo.
2. O uso freqüente das práticas agrícolas de revolvimento do solo promoveu menor teor de BMS-C e aumentou a atividade metabólica (qCO_2) nas áreas de lavouras, ao contrário das pastagens, com elevada entrada de biomassa, ausência de revolvimento do solo e a concentração do sistema radicular na camada superficial do solo sendo as principais causas da maior quantidade de C acumulado na BMS.
3. O impacto negativo gerado pelas atividades antrópicas promove baixa eficiência metabólica da BMS mesmo após 8 anos de reflorestamento da área de clareira, porém mostra tendência de recuperação nos teores de Corg e BMS-C em relação à área de empréstimo de solo.
4. A geoestatística permitiu conhecer como os atributos de biomassa microbiana e emissões de CO_2 variam dentro de cada ambiente, determinando o nível de dependência espacial e o padrão de variabilidade espacial, enquanto que a análise multivariada permitiu comparar como estes atributos variam entre os ambientes, sendo estas ferramentas estatísticas complementares.
5. Este trabalho contribuiu com dados medidos em campo para aperfeiçoar as estimativas de BMS em diferentes ecossistemas terrestres, com o intuito de alimentar um banco de dados de BMS para auxiliar os modelos de predição de estoque e emissões de carbono realizados pelo IPCC.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. Caminhos futuros para o avanço das pesquisas relacionadas a BMS tendem para a necessidade do estabelecimento dos valores de referência e o mapeamento digital da BMS.
2. Variações climáticas e topográficas podem ser bons preditores de estoque de C pela BMS, devendo-se levar em consideração no mapeamento digital e estabelecimento dos valores de referência do BMS-C. A partir do reconhecimento do padrão de variabilidade da BMS em função das variáveis climáticas e da sua dependência topográfica, modelos podem ser gerados para auxiliar o mapeamento digital da BMS.
3. Solo com vegetação original do bioma tem valores maiores de BMS, e podem servir como padrão interno. Há variação entre cada bioma, assim a importância do padrão interno (bench marking) por local/região. Atenção para o solo com pastagem, pois o mesmo pode aumentar o estoque de carbono na BMS em relação aos solos sob florestas.
4. Impacto do manejo nas lavouras é grande e faz diferenciação, ou seja, o método é sensível. Para modelagem manejo certamente entraria com função ponderada maior de acordo com a hierarquia do manejo conservacionista esperado.
5. Somente entre solos muito contrastantes há diferenciação nítida para BMS: exemplo, Gleissolo para Cambissolo. O uso de uma faixa de valores de referência pode ser mais apropriado pois dentro de cada tipo de solo há uma variação natural por regime hídrico, estação do ano, relevo etc.
6. Valores muito elevados de BMS-C acima de $1000 \text{ mg C kg}^{-1}$ solo podem ocorrer com doses altas de MO, como no caso dos solos com influência de guano, porém em condições de vegetações naturais é indicativo de outliers. Espectro de variação nos ecossistemas naturais predominante entre valores de 100 a 400 mg C kg^{-1} para BMS.
7. O avanço de pesquisas correlatas de BMS nos ecossistemas naturais na Amazônia, Mata Atlântica e Antártica, dentre outros, tende para o uso de técnicas refinadas baseadas na extração e análise de ácidos nucléicos provenientes de amostras de solo nos ecossistemas naturais e antropizados, e têm demonstrado potencial para o entendimento do papel dos grupos funcionais microbianos nas emissões de gases de efeito estufa (CO_2 , CH_4 e N_2O).

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADINSOFT. 2004. XLSTAT-PLS 1.8. Statistical software to MS Excel.

AJTAY, G.L., KETNER, P., DUVIGNEAUD, P. Terrestrial primary production and phytomass. In: Bolin, B., Degens, E.T., Kempe, S., Ketner, P. (Eds.), *The Global Carbon Cycle*. John Wiley & Sons, Chichester, 1979. 129–181p.

ALBUQUERQUE FILHO, M. R. SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; COSTA, L. M. DIAS, J. R.; PEREIRA, V. V.; COELHO, L. M. Características Físicas e Químicas de Solos sobre Rochas Vulcânicas na Península Keller, Antártica Marítima, Viçosa, 2004. 27-34p.

ALMEIDA, D. L. de; RIBEIRO, R. L. D.; GUERRA, J. G. M. Sistema de Produção Agroecológico (“Fazendinha” Agroecológica KM 47). *Agricultura Ecológica*. 2ª Simpósio de Agricultura Orgânica e 1ª Encontro de Agricultura Orgânica; Edmilson Ambrosano (coord.).- Guaíba: Agropecuária, 1999. 398p.

ALVES, B. J. R.; SANTOS, J. C. F.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Métodos de determinação do nitrogênio em solo e planta. In: HUNGRIA, M.; ARAÚJO, R. S. (Ed.). *Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola*. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, 1994. p. 449-469. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 46).

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. Determination of ecophysiological maintenance carbon requirements of soil microorganisms in a dormant state. *Biol. Fertil. Soil*, 1: 81-89, 1985.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. Application of eco-physiological quotients (qCO_2 and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biol. Biochem.*, 22:251-255, 1990.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K.H. The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, 25:393-395, 1993.

ANISIMOV, O.A. Impact of climate change on heating and air-conditioning. *Meteorology and Hydrology*. 6, 10-17 (1999).

ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R.; ABARKELI, R. B. Effect of glyphosate on the microbial activity of two Brazilian soils. *Chemosphere*, Oxford, v. 52, p. 799-804, 2003.

ARAÚJO, S.P. Atributos biológicos do solo sob diferentes coberturas vegetais amostrados em duas estações do ano numa topossequência no Noroeste Fluminense – RJ. Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2003. 51p. (Tese de Mestrado).

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W.J.; LACERDA, M.P.C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.1099-1108, 2007.

ARCTIC CLIMATE IMPACT ASSESSMENT (ACIA). *Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2004).

ARIGONY NETO, J. Determinação e interpretação de características glaciológicas e geográficas com sistema de informações geográficas na Área Antártica Especialmente Gerenciada Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Antártica. Tese de Mestrado. UFRGS. 2001. 84p.

BAKER, A. D.; ZUBERER, D. A.; WILDING, L. P. Inconsistence in methods for measuring bioavailable carbon and microbial biomass in soil from the NRCS wet soil monitoring project, An International Workshop on Assessment Methods for soil C Pools, 2-5 nov. Ohio Univ./USDA, Abstract and Program. p.11, 1998.

BALOTA, E. L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D.S.; HUNGRIA, M. 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.641-650, 1998.

BARRETO, P.A.B.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; BARROS, N.F.; FONSECA, S. Atividade microbiana, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de eucalipto, em seqüência de idades. R. Bras. Ci. Solo, 32:611-619, 2008.

BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008. p.7-18.

BEKKU, Y.; KUME, A.; NAKATSU, T.; MASUZAWA, T.; KANDA, H.; KOIZUMI, H. Microbial biomass in relation to primary succession on Arctic deglaciated moraines. Polar Biosci., 12, 47-53, (1999).

BERNOUX, M.; VOLKOFF, B. Soil carbon stock in soil ecoregions of Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth, 2006. p.65-75.

BEYER L.; PINGPANK K.; BÖLTER M.; SEPPELT R.D. Soil organic matter storage in cold soils of coastal eastern Antarctica (Casey Station, Wilkes Land). In: J.R. Kimble (ed.) *Cryosols*. Springer-Verlag, Heidelberg: 509-524 (2004).

BEYER, L.; BOCKHEIM, J.; CAMPBELL, I.B.; CLARIDGE, G.G.C. Properties, genesis and global significance of Antarctic Cryosols. *Antarctic Science*, (1999) 11: 387-398.

BILLINGS, W. D. 1987. Carbon balance of Alaskan tundra and taiga ecosystems: past, present and future. *Quaternary Science Reviews* 6:165-177.

BLUME H.-P., KUHN D. and BÖLTER M. Soils and Soilscapes. In: L. Beyer and M. Bölker (eds) *Geoecology of Antarctic Ice-free Coastal Landscapes*. Ecological Studies 154, Springer, Berlin: 91-113 (2002).

BOCKHEIM, J.G.; TARNOCAL, C. Recognition of cryoturbation for classifying permafrost-affected soils. *Geoderma* 81, 281-293 (1998).

BOLTER, M. Microbial activity in soils from Antarctica (Casey Station, Wilkes Land). Proc. NIPR Symp. Polar Biol., 2, 146-153 (1989).

BOLTER, M. Estimations of microbial biomass by direct and indirect methods with special respect to monitoring programs. Proc. NIPR Symp. Polar Biol., 7, 198-208, (1994).

BRASIL – MAPA (Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento) 2009. Legislação para os sistemas orgânicos de produção. SINAGRI – Biblioteca Nacional de Agricultura, Brasília, 195p.

BREMNER, J. M.; MULVANEY, C. S. Nitrogen total. In: PAGE, A. L., ed. Methods of soil analysis. Part 2. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1982. p. 595-624.

BROOKES, D. C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. Biology and Fertility of Soils, Berlin, v. 19, p. 269-279, 1995.

BROOKES, P. C.; LANDMAN, A.; PRUDEN, G.; JENKINSON, D. S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. Soil Biology & Biochemistry, Oxford, v. 17, p. 837-842, 1985.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. Soil Biology & Biochemistry, Oxford, v. 14, n. 4, p. 319-329, 1982.

BROWN, J., HINKEL, K., NELSON, F.E., 2000. The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: research designs and initial results. Polar Geography 24, 165–258.

CAMPBELL, I.B.; CLARIDGE, G.G.C. Landscape evolution in Antarctica. Earth-Sci. Rev., 25 (1988), pp. 345–353.

CAMPBELL, I.B.; CLARIDGE, G.G.C. Antarctica: Soils, Weathering Processes and Environment. Amsterdam: Elsevier Publisher. (1987) 368 pp.

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; MOREIRA, F. M. de S.; CURI, N. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em pastagem cultivada e nativa no Pantanal. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 44, n. 6, p. 631-637, 2009.

CARNEIRO, M.A.C.; ASSIS, P.C.R.; MELO, L.B. de C.; PEREIRA, H.S.; PAULINO, H.B.; SILVEIRA NETO, A.N. da. Atributos bioquímicos em dois solos de cerrado sob diferentes sistemas de manejo e uso. Pesquisa Agropecuária Tropical, v.38, p.276-283, 2008.

CARTER, M. R. Microbial biomass as an index for tillage-induced changes in soil biological properties. Soil Tillage Research, Amsterdam, v. 7, p. 29-40, 1986.

CARVALHO, J.L.N.; AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N.; MELLO, C.R.; CERRI, C.E.P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 34:277-289, 2010.

CATTELAN, A. J.; VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo em função de variações ambientais. Revista Brasileira de Ciência do solo, Campinas, v.14, n.2, p. 133-142, 1990.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; CERRI, C.E.P. & LAL, R. Challenges and opportunities of soil carbon sequestration in Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth, 2006a. p.41-47.

CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B. & RONDÓN, M.A. Potential of soil carbon sequestration in the Amazonian Tropical Rainforest. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth, 2006b. p.245-266.

CERRI, C.E.P.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; COLEMAN, K.; BERNOUX, M.; POWLSON, D.S.; BATJES, N.H.; MILNE, E. & CERRI, C.C. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 122:58-72 (2007).

CHAPIN, F. S. III et al. Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science* 310, 657–660 (2005).

CHENG, W. & VIRGINIA, R.A. Measurement of microbial biomass in Arctic tundra soils using fumigation-extraction and substrate-induced respiration procedures.- *Soil Biol. Biochem.* 25: 135-141 (1993).

CHRISTENSEN, B. T. Organic matter in soil – structure, function and turnover. DIAS Report no. 30. Plant production, Tjele. p. 95, 2000.

COWAN, D.A., MAMAIS, A., SHEPPARD, D., & RUSSELL, N. Antarctic Dry Valley mineral soils contain unexpectedly high levels of microbial biomass. *EXTREMOPHILES* 6(5):431-436 (2002).

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440, 165-173 (2006).

DEMATTE, J.L.I. Manejos de solos ácidos dos trópicos úmidos – Região Amazônica. Campinas: Fundação Cargill, 1988. 215p.

DE-POLLI, H.; GUERRA, J. G. M. C, N e P na Biomassa Microbiana do Solo. In: Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo. Ed. SANTOS, G. de A. & CAMARGO, F. A. de O. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 389 - 411.

DIXON, R.K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R.A.; SOLOMON, A.M.; TREXLER, M.C. & WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263:185-190, 1994.

DUXBURY, J. M.; SMITH, M. S; DORAN, J. W.; JORDAN, C.; SZOTT, L.; VANCE, E. Soil organic matter as a source and sink of plant nutrients. In: COLEMAN, D. C.; OADES, J. M.; UEHARA, G. (Ed.). Dynamics of soil organic in tropical ecosystems. Honolulu: University of Hawaii Press, 1989. p. 33-67.

EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2 Edição. Revista atual. Rio de Janeiro, 212 p. 1997.

ESWARAN, H.; van den BERG, E. & REICH, P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:192-194, 1993.

FLORINSKY, I.V.; EILERS, R.G.; MANNING, G.; FULLER, L.G. Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Environmental Modelling and Software* 17, 295– 311 (2002).

FLORINSKY, I.V.; KURYAKOVA, G.A. Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations—exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale. *International Journal of Geographical Information Science* 14, 815– 832 (2000).

FLORINSKY, I.V.; MCMAHON, S.; BURTON, D.L. Topographic control of soil microbial activity: a case study of denitrifiers. *Geoderma* 119 (2004) 33–53.

FRANCHINI, J.C.; CRISPINO, C.C.; SOUZA, R.A.; TORRES, E.; HUNGRIA, M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, v.92, p.18-29, 2007.

GAMA-RODRIGUES, E. F. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O., eds. *Fundamentos da matéria orgânica do solo-Ecosistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre, Gênese, 1999. p. 227-244.

GAMA-RODRIGUES, E.F. da; GAMA-RODRIGUES, A.C. da. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L.S. da; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A. de O. (Ed.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2.ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.159-170.

GAMA-RODRIGUES, E.F.; BARROS, N.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C. & SANTOS, G.A. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:393-901, 2005.

GOLDEN SOFTWARE, Surfer V 7.02. Surface Mapping System, 2000. Colorado USA.

GONÇALVES, A. S. ; MONTEIRO, M. T. ; GUERRA, J G M ; COSTANTINI, A. O. ; DE-POLLI, H. Biomassa microbiana em amostras umedecidas após secagem ao ar de solos de toposequência de pastagens. *Ciencia del Suelo*, v. 25, p. 81-87, 2007.

GRUBER, N. et al. in *Toward CO2 Stabilization: Issues, Strategies, and Consequences* (eds Field, C. B. & Raupach, M. R.) 45–76 (Island Press, Washington, DC, 2004).

HASSINK, J. Decomposition rate constants of size and density fractions of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:1631-1635, 1995.

HOLDING, A.J.; COLLINS, V.G.; FRENCH, D.D.; D'SYLVA, B.T.; BAKER, J.H. Relationship between viable bacterial counts and site characteristics in tundra. in: HOLDING, A.J.; HEAL, O.W.; MACLEAN Jr, S.F.; Flanagan, P.W. (Eds.), *Proceedings of the*

Microbiology, Decomposition and Invertebrate Working Groups Meeting, Soil Organisms and Decomposition in Tundra, Stockholm (1974), pp. 49–64.

HOFSTEE, E.H.; BALKS, M.R.; PETCHEY, F.; CAMPBELL, D.I. Soils of Seabee Hook, Cape Hallett, northern Victoria Land, Antarctica. *Antarctic Science* 18 (4), 473–486 (2006).

IPCC 2007 Summary for policymakers. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC 2007a. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2001. In: HOUGHTON, J.T., DING, Y., GRIGGS, D.J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P.J., XIAOSU, D. (Eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

ISERMEYER, H., 1952: Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Carbonate im Boden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 56: 26–38.

JANZEN, H. H. Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104, 399–417 (2004).

JANZEN, H.H.; CAMPBELL, C.A.; BRANDT, S.A. Lightfraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1799-1806, 1992.

JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil: Measurement and Turnover. In: PAUL, E. A.; LADD, J. N., eds. *Soil Biochemistry*. New York, Marcel Dekker, 1981. v.5. p.415-471.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. Method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 8:209-213, 1976.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Quantifying effects of different agricultural land uses on soil microbial biomass and activity in Brazilian biomes: inferences to improve soil quality. *Plant Soil* (2011) 338:467–481.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. *Soil Biology & Biochemistry* 42 (2010) 1–13.

KIMBLE, J.M (ed). *Cryosols, Permafrost-affected soils*. Springer-Verlag. 725p. 2004

KNORR, W.; PRENTICE, I. C.; HOUSE, J. I.; HOLLAND, E. A. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature* 433, 298–301 (2005).

KOZERETSKA, I.A.; PARNIKOZA, I.YU.; MUSTAFA, O.; TYSCHENKO, O.V.; KORSUN, S.G.; CONVEY, P. Development of Antarctic herb tundra vegetation near Arctowski station, King George Island. *Polar Science* 3 (2010) 254-261.

KUHN, D. Genese, Okologie und Soziologie einer Bodengesellschaft in einem Periglazialgebiet der King-George-Insel (West-Antarktis). *Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel*, 40: 1–173 (1997).

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304:1623-1627, 2004.

LAL, R. Soil carbon sequestration in Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth Press, 2006. p.49-64.

LAURANCE, W.F.; COCHRANE, M.A.; BERGEN, S.; FEARNSIDE, P.M.; DELAMÔNICA, P.; BARBER, C.; D'ANGELO, S. & FERNANDES, T. The future of Brazilian Amazon. *Science*, 291:438-439, 2001.

LAVIAN, I.L.; VISHNEVETSKY, S.; BARNES, G.; STEINBERGER, Y. Soil microbial community and bacterial functional diversity at Machu Picchu, King George Island, Antarctica. *Polar Biology* (2001) 24: 411–416.

LOUREIRO, D.C.; DE-POLLI, H.; CEDDIA, M.B.; AQUINO, A.M. Spatial variability of microbial biomass and organic matter Labile pools in a haplic planosol soil. *Bragantia*, Campinas, v. 69, Suplemento, p. 85-95, 2010.

MARCHIORI J. R. M.; MELO, W. J. Carbono, carbono da biomassa microbiana e atividade enzimática em um solo sob mata natural, pastagem e cultura do algodoeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, n. 257-263, 1999.

MENDONÇA, E.S.; SCALA, N.L. Jr.; PANOSSO, A.R.; SIMAS, F.N.B.; SCHAEFER, C.E.G.R. Spatial variability models of CO₂ emissions from soils colonized by grass (*Deschampsia antarctica*) and moss (*Sanionia uncinata*) in Admiralty Bay, King George Island *Antarctic Science* 23(1), 27–33 (2011)

MELLO, F.F.C.; CERRI, C.E.P.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B. & CERRI, C.C. Potential of soil carbon sequestration for the Brazilian Atlantic Region. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth, 2006. p.349-368.

MICHAELSON, G. J.; DAI, X. Y.; PING, C. L. Organic Matter and Bioactivity in Cryosols of Arctic Alaska. In: KIMBLE, J. M. (ed). *Cryosols, Permafrost-affected soils*. Berlin: Springer-Verlag, p.463-479, 2004.

MICHEL, R.F.; SHAEFER, C.E.G.R.; DIAS, L.E.; SIMAS, F.N.B.; DE MELO BENITES, V.; DE SÁ MENDONÇA, E. Ornithogenic Gelisols (Cryosols) from Maritime Antarctica. *Soil Science Society American Journal* 70: 1370–1376 (2006).

MICHEL, R.F.M. Solos criogênicos e ornitogênicos da área de entorno da Ponta Llano, Antártica marítima. M.S., Universidade Federal de Viçosa, Novembro 2005.

MYRCHA, A.; TATUR, A. Ecological role of the current and abandoned penguin rookeries in the land environment of the maritime Antarctic. *Polish Polar Research*, 12:1 3-24, 1991.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica da matéria orgânica e da biomassa microbiana em solo submetido a diferentes sistemas de manejo na Amazônia Ocidental. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.39, n.11, p.1103-1110, nov. 2004.

NEVES, M. C. P.; GUERRA, J. G. M.; CARVALHO, S. R.; RIBEIRO, R. L. D.; ALMEIDA, D. L. de. Sistema integrado de produção agroecológica ou fazendinha agroecológica do km 47. In.: AQUINO, A. & ASSIS, R. L. (org) *Agroecologia: princípios e técnica para uma agricultura orgânica sustentável*. Brasília, EMBRAPA- Informação tecnológica. 2005. 147-172 p.

OCIO, J. A.; BROOKES, P. C. An evaluation of methods for measuring the microbial biomass in soils following recent additions of wheat straw and characterization of the biomass that develops. *Soil Biology and Biochemistry*, v.22, p.685-694, 1990.

OECHEL, W. C.; BILLINGS, W. D. Effects of global change on the Carbon balance of Arctic plants and ecosystems. In: CHAPIN III, F. S.; JEFFERIES, R. L.; REYNOLDS, J. F.; SHAVER, G. R.; SVOBODA, J. (eds). *Arctic Ecosystems in a Changing Climate*. Academic Press, p. 139–168, 1992.

OLIVEIRA, L. A. Phosphorus related to plant growth and plant-microorganism associations in Amazonian soils. In: *Anais de Workshop "Phosphorus Cycles In Terrestrial and aquatic Ecosystems: Regional Workshop 3: South and Central América"*, Caracas, Venezuela. Phosphorus Cycles Scientific Advisory Committee. P.186-195 (1991).

ORCHARD, V.A. & CORDEROY, D.M. Influence of environmental factors on the decomposition of penguin guano in Antarctica. *Polar Biology*, 1, 199-204 (1983).

OSTERKAMP, T. E.; ROMANOVSKY, V. E. Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska. *Permafrost Periglacial Process*. 10, 17–37 (1999).

PARK, J.H., DAY, T.A., STRAUSS, S. & RUHLAND, C.T. Biogeochemical pools and fluxes of carbon and nitrogen in a maritime tundra near penguin colonies along the Antarctic Peninsula. *Polar Biology*, 30, 199–207 (2007).

PARKINSON, D.; COLEMAN, D. C. Methods for assessing soil microbial populations, activity and biomass microbial communities, activity and biomass. *Agric. Ecosyst. Environm.*, 34:3-33, 1991.

PARNIKOZA, I.YU.; INOZEMTSEVA, D.M.; TYSCHENKO, O.V.; MUSTAFA, O.; KOZERETSKA, I.A. Antarctic herb tundra colonization zones in the context of ecological gradient of glacial retreat. *Ukr. Botan. Journ.*, 2008, vol. 65, N° 4.

PAUL, E. A.; VORONEY, R. P. Nutrient and energy flows through soil microbial biomass, in Ellwood, D. C., *et al.* (eds) *Contemporary Microbial Ecology*, London, Academic Press, 215-237 (1980).

PAUL, E.A.; CLARK, F.E. *Soil Microbiology and Biochemistry*. San Diego, CA, Academic Press, 1989. 275p.

PAUSTIAN, K.; SIX, J.; ELLIOTT, E.T. & HUNT, H.W. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*, 48:147-163, 2000.

PIETR, S. J.; TATUR, A.; MYRCHA A. Mineralization of penguin excrements at Admiralty Bay region (King George Island, South Shetland Islands, Antarctic) — *Polish Polar Research.*, 4: 97—112, 1983.

PINHEIRO, E. F. M., PEREIRA, M. G., ANJOS, L. H. C. Aggregation distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. *Soil & Tillage Research*, 77: 79-84, 2004.

PFENNING, L., B. DE P. EDUARDO & CERRI, C.C. Os Métodos de Fumigação-Incubação e Fumigação-Extração na Estimativa da Biomassa Microbiana de Solos da Amazônia. *Rev. Bras. Ci. Solo* 16: 31-37, 1992.

RAKUSA-SUSZCZEWSKI, S.; MIETUS, M.; PIASECKI, J. Weather and climate. In: RAKUSA-SUSZCZEWSKI, S. (ed.) *The maritime Antarctic coastal ecosystem of Admiralty Bay*. Warsaw, Polskiej Akademii Nauk, p.19–25 (1993).

ROSCOE, R. & MACHADO, P. L. O. A. Fracionamento físico do solo em estudos da material orgânica. Publicações Embrapa Solos e Embrapa Agropecuária Oeste, 2002.

ROSER, D. J.; SEPPELT, R. D.; ASHBOLT, N. Microbiology of ornithogenic soils from the Windmill islands, budd coast, continental Antarctica: microbial biomass distribution. *Soil Biology & Biochemistry* 25 (1993) 165-175.

RUIVO, M. L. P.; AMARAL, I. G.; GUEDES, A. L. S; RIBEIRO, E. L. C. Os solos de uma topossequência na Ilha de Algodoal/Maiandeuá, nordeste do estado do Pará, Brasil: composição química e produção de matéria orgânica. *Acta Amazôn.*, v. 32, n. 2, p. 257-266, 2002.

SAMPAIO, D. B.; ARAÚJO, A. S. F.; SANTOS, V. B. Avaliação de indicadores biológicos de qualidade do solo sob sistemas de cultivo convencional e orgânico de frutas. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 32, n. 2, p. 353-359, 2008.

SANCHEZ, P.A.; BANDY, D.E.; VILLACHICA, J.H.; NICHOLAIDES, J.J. Amazon basin soils: Management for continuous crop production. *Science*, v.216, p.821-827, 1982.

SANTANA, R.C. Predição de biomassa e alocação de nutrientes em povoamentos de eucalipto no Brasil. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 71p. (Tese de Doutorado).

SANTANA, R.M. Mapeamento de geounidades do meio físico e biótico em área da Antártica Marítima. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2006.

SANTOS, T.E.B., NAKAYAMA, F.T., ARF, O., CASSIOLATO, A.M.R. Variáveis microbiológicas e produtividade do arroz sob diferentes manejos de sojo e água. *Acta Scientiarum: Agronomy* 29, 355–366 (2007).

SCHAEFER, C.E.G.R.; SIMAS, F.N.B.; GILKES, R.J. ; COSTA, L.M. da; ALBUQUERQUE, M.A. Micromorphology and Microchemistry of Selected Cryosols from Maritime Antarctica. *Geoderma* (Amsterdam), v. 144, p. 104-115, 2008.

SCHARPENSEEL, H.W. Preface to workshop ‘Management of carbon in tropical soils under global change: Science, practice and policy. *Geoderma*, 79:1-8, 1997.

SERREZE, M. C. et al. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Clim. Change* 46, 159–207 (2000).

SETZER, A.W.; ROMÃO, M.O.; FRANCELINO, M.R.; SCHAEFER, C.E.R.G.; COSTA, L.M. & BREMER, U.F. Regime climático na Baía do Almirantado: relações com o ecossistema terrestre. In: SCHAEFER C.E.G.R., FRANCELINO, M.R., SIMAS. F.N.B. & ALBUQUERQUE FILHO, M.R. *Ecossistemas Terrestres e Solos da Antártica Marítima*. 2004. 192p.

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007c (Comunicado Técnico 99).

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007b (Comunicado Técnico 98).

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação do nitrogênio da biomassa microbiana do solo. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007a (Comunicado Técnico 96).

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S. Matéria orgânica do solo. In: Vargas, M. T.; Hungria, M. G. (Ed.). *Biologia dos solos dos cerrados*. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1997. P. 465-524.

SILVA, M.B. da; KLIEMANN, H.J.; SILVEIRA, P.M.; LANNA, A.C. Atributos biológicos do solo sob influência da cobertura vegetal e do sistema de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, p.1755-1761, 2007.

SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; MICHEL, R. M.; DIAS, L. E.; JR. BORGES, M.; PRATES, L. Atributos Químicos de Criosolos Ornitogênicos da Baía do Almirantado, Antártica, Viçosa, 2004. 41-46p.

SIMAS, F.N.B., SCHAEFER, C.E.G.R., MENDONÇA, E.S., SILVA, I.R., SANTANA, R.M.; RIBEIRO, A.S.S. Organic carbon stocks in permafrost-affected soils from Admiralty Bay, Antarctica. In COOPER, A.K. & RAYMOND, C.R., *Eds. Antarctica: a keystone in a changing world* – Online Proceedings of the 10th ISAES X. 2007.

SIMAS, F.N.B.; SCHAEFER, C.E.G.R.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R. DE; FRANCELINO, M.R.A.; FERNANDES FILHO, E.I.; GILKES, R.J.; COSTA, L.M. da. Genesis, Properties and Classification of Cryosols from Admiralty Bay, Maritime Antarctica. *Geoderma* (Amsterdam), v. 144, p. 116-122, 2008.

SIQUEIRA, J.O.; FRANCO, A.A. *Biotechnology do solo: Fundamentos e Perspectivas*. Brasília: MEC/ABEAS, 236p:il. (1988).

SKJEMSTAD, J.; DALAL, R.bC. Spectroscopic and chemical differences in organic matter of two Vertissols subjected to long periods of cultivation. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, v. 25, p. 323-335, 1987.

SLAYMAKER, O.; KELLY, R.J. *The cryosphere and global environmental change*. Environmental Systems and Global Change Series. Oxford: Blackwell Publishing, 2007, 261 pp,

SMITH, J. L.; PAUL, E. A. The significance of soil biomass estimates. In: BOLLAG, J. M.; STOTTZKY, G., ed. *Soil Biochemistry*, 6. New York: Marcel Decker, p. 357-396. 1990.

SOHI, S.; MAHIEU, N.; ARAH, J.R.M.; POWLSON, D.S.P.; MADARI, B.; GAUNT, J.L. Procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1121-1128, 2001.

SOUZA, E.D. et al. Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob Cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. *Acta Sci. Agron.*, Maringá, v. 28, n. 3, p. 323-329, 2006.

SOUZA, R.A.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J.C.; CHUEIRE, L.M.O.; BARCELLOS, F.G.; CAMPO, R.J. Avaliação qualitativa e quantitativa da microbiota do solo e da fixação biológica do nitrogênio pela soja *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.43, n.1, p.71-82, jan. 2008.

SPARLING, G. P.; VOJVODC-VUKOVIC, M.; SCHIPPER, L. A. Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.*, 30 (10-11): 1472-1479, 1998.

SPARLING, G. P. Ratio of biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Aust. J. Soil Res.*, 30:195-207, 1992.

SPARLING, G. P.; WEST, A. W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: calibration in situ using microbial respiration and ¹⁴C. Labelled cells. *Soil Bio. Biochem.* Oxford, v.20, n.3, p.337-343, 1988.

SPEIR, T.W.; COWLING, J.C. Ornithogenic soils of the Cape Bird Adélie penguin rookeries, Antarctica. 1. Chemical properties. *Polar Biology*, 2, 199.205, 1984.

SUN, L.G.; ZHU, R.B.; XIE, Z.Q.; XING, G.X. Emissions of nitrous oxide and methane from Antarctic tundra: role of penguin dropping deposition. *Atmospheric Environment* 36, 4977-4982, 2002.

TATE, K. R.; ROSS, D. J.; FLETAM, C. W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: effects of experimental variables and some different calibration procedures. *Soil Biol. Biochem.*, Oxford, 20:329-335, 1988.

TATUR A. 1989. Ornithogenic soils of maritime Antarctic. *Polish Polar Research* 10: 481-532.

TATUR, A.; BARCZUK, A. Ornithogenic Phosphates on King George Island, maritime Antarctic. In: W.R. Siegfried, P.R. Condy, R.M. Laws (eds). Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs. Springer-Verlag, Berlin, Alemanha. 700 p. 1983.

TATUR, A.; MYRCHA, A. Ornithogenic soils of King George Island. Polish Polar Research 5:31-60. 1984.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; VLKWEISS, S. J. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, 1995. 174 p.

TER BRAAK, C.J.F.; SMILAUER, P. Canoco for Windows v. 4.5. CPRO-DLO, Wageningen, Netherlands, 2002.

TSCHERKO, D.; BÖLTER, M.; BEYER, L.; CHEN, J.; ELSTER, J.; KANDELER, E.; KUHN D.; BLUME, H.P. Biomass and enzyme activity of two soils transects at King George Island, Maritime Antarctic. *Arctic Antarctic Alpine Research* 35: 34–47 (2003).

UGOLINI, F.C. 1972. Ornithogenic soils of Antarctica. Antarctic Research Series, 20, 181.193.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extration method for measuring soil microbial biomass C . *Soil Biol. Biochem.*, Oxford, 19:703-707, 1987.

VARGAS, L. K; SCHOLLES, D. Biomassa microbiana e produção de C-CO₂ e N mineral de um Podzólico vermelho-escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 24, p. 35-42, 2000.

VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C. Amazônia: seus solos e outros recursos naturais. São Paulo: Ceres, 1987. 416p.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geoestatistical Theory and Application to Variability of Some Agronomical Properties. *Hilgardia*, v.51, n.3,1983.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, Baltimore, v. 37, p. 29-38, 1934.

WANDER, M. M.; TRAINA, B.R. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools. *Soil Science Society of America Journal*, 58-1130-1139, 1994.

WARDLE, D.A. A comparative assessment of factors wich influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soils. *Biological Reviews*. v.67, p. 321-358. 1992.

WATSON, R. T.; RODHE, H.; OESCHGER, H.; SIEGENTEHLER, U. I. Greenhouse gases and aerosols In: HOUGHTON, J. T.; JENKINGS, G. J.; EPHRAUMS, J. J. (Ed.). *Climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen), 1998. Die Anrechnung biologischer Quellen und Senken im Kyoto-Protokoll: Fortschritt oder Rückschlag für den globalen Umweltschutz? WBGU, Bremerhaven, 76 pp.

WITT, C.; GAUNT, J. L.; GALICIA, C. C.; OTTOW, J. C. G.; NEUE, H. U. A rapid chloroformfumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon and nitrogen in flooded rice soils. *Biology and Fertility of Soils*, v. 30, n. 5-6, p. 510-519, mar. 2000.

XAVIER, F.A.S.; MAIA, S.M.F.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibiapaba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.247-258, 2006.

ZDANOWSKI, M.K.; ZMUNDA, M.J.; ZWOLSKA, I. 2005. Bacterical role in the decomposition of marine-derived material (penguin guano) in the terrestrial maritime Antarctic. *Soil Biology & Biochemistry*, 37, 581-595.

ZHANG, W.; PARKER, K.M.; LUO, Y.; WAN, S.; WALLANCE, L.L.; HU, S. Soil microbial responses to experimental warming and clipping in a tallgrass prairie. *Global Change Biology* 11, 266-277 (2005).

ZHU, R.; LIU, Y.; XU, H.; MA, J.; GONG, Z.; ZHAO, S. Methane emissions from three sea animal colonies in the maritime Antarctic. *Atmospheric Environment* 42 (2008) 1197–1205.
ZOU, X.M.; RUAN, H.H.; FU, Y.; YANG, X.D.; SHA, L.Q. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation–incubation procedure. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 37, n. 10, p. 1923-1928, (2005).