

PEDOLOGIA BRASILEIRA NA ANTÁRTICA: A PESQUISA DE SOLOS AFETADOS POR PERMAFROST NO CENÁRIO DO AQUECIMENTO GLOBAL

BRAZILIAN PEDOLOGY IN ANTARCTICA: THE PERMAFROST-AFFECTED SOILS RESEARCH IN THE GLOBAL WARMING SCENARIO

Thiago Torres Costa Pereira

Universidade do Estado de Minas Gerais-DCET. Av. Mário Palmério, 1001, Frutal-MG, CEP 38200-000
thiago.solos@gmail.com

Carlos Ernesto G. R. Schaefer

INCT-Criosfera. Universidade Federal de Viçosa-DPS. Av. P.H.Rolfs, s/n, Viçosa-MG, CEP 36570-000
carlos.schaefer@ufv.br

Rafael de Ávila Rodrigues

Universidade do Estado de Minas Gerais-DCET. Av. Mário Palmério, 1001, Frutal-MG, CEP 38200-000
rafael.avila.rodrigues@gmail.com

Leandro de Souza Pinheiro

Universidade do Estado de Minas Gerais-DCET. Av. Mário Palmério, 1001, Frutal-MG, CEP 38200-000
bandopinheiro@yahoo.com.br

RESUMO

A Antártica representa um ambiente peculiar para formação de solos e estudo de muitos de seus processos, sendo que alguns dos quais possuem características atípicas. Solos afetados por permafrost são encontrados nas regiões árticas e subárticas, em altas montanhas e nas regiões livres de gelo da Antártica, e abrangem cerca de 13 % da cobertura terrestre. Atualmente, é inegável a influência do permafrost sobre os recursos hídricos, propriedades do solo, e desenvolvimento de vegetação. Além destes, uma série de questões estão relacionadas às mudanças no balanço de carbono, em reflexo à degradação do permafrost pelo aumento de temperatura. As quatro maiores regiões da Criosfera no mundo são: Antártica, Oceano Ártico, as neves extrapolares e os ambientes montanhosos bastante frios. Mudanças na Criosfera em resposta ao aquecimento global são prováveis de serem observadas inicialmente em zonas de transição, em torno das extremidades de geleiras e camadas de gelo, e em áreas de permafrost, ambientes que em contrapartida, influenciam, mesmo que indiretamente, todas as superfícies da Terra. O debate sobre a possibilidade da ocorrência de aumento da temperatura global causado pelos gases do efeito estufa despertou atenção de pesquisadores sobre o estado de equilíbrio das grandes massas de gelo e permafrost presentes na Antártica. Outros fatores importantes envolvem as interações que influenciam diretamente as relações tróficas e rotas de transferência de matéria e energia entre o oceano e as áreas costeiras na Antártica. Nestes locais, existe grande aporte de materiais orgânicos depositados por aves, com destaque para os pinguins, sendo a incorporação destes materiais orgânicos à matriz mineral do solo a principal influência na caracterização dos solos ornitogênicos. Diante destes fatos, foram iniciados em 2002 os estudos pedológicos pelo então Projeto Criosolos, atual Núcleo Terrantar. Os trabalhos do Terrantar, que começaram na Baía do Almirantado - Ilha Rei George, foram se expandindo ao longo das Ilhas Shetlands do Sul e Península Antártica, sendo Hope Bay, no extremo norte da Península, o primeiro trabalho efetivamente realizado no continente antártico pelo referido Núcleo. Diversos trabalhos foram produzidos, com destaque para as características morfológicas, físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas dos solos, além de mapeamentos, em trabalhos típicos de pedologia e levantamentos de solos, apresentados nesta revisão.

Palavras-chave: Criosolos, Gelissolos, solos ornitogênicos.

ABSTRACT

Antarctica is a unique environment for soil formation. Permafrost-affected soils are found in Arctic and Subarctic regions, in high mountains and ice-free areas of Antarctica, and cover about 13 % of soilscape. Currently, there is an undeniable influence of permafrost on water resources, soil properties and vegetation growth, and changes in carbon balance. The four major regions of Cryosphere in the world are: Antarctica, Arctic Ocean, the extra-polar snows and very cold mountain environments. Changes in Cryosphere in response to global warming are likely to be observed initially in transition zones, around the ends of glaciers and ice sheets, and in areas of permafrost environments. Important factors in Antarctica involve interactions that directly influence the trophic relationships and routes transfer of matter and energy between the ocean and coastal areas. In these places, there is large amount of organic matter deposited by birds, especially penguins, and incorporation of organic materials to soil mineral matrix, that characterizes the ornithogenic process. Given these issues, were started in 2002 by Terrantar Group, studies about soils and terrestrial ecosystems. The work, that began in Admiralty Bay - King George Island, has been expanding along the South Shetland archipelago and Antarctic Peninsula. Hope Bay, on the northern tip of the Peninsula, is the first studies of soils in Antarctic continent. Along the years, many works were realized, with emphasis in morphology, physic, chemical, mineralogy and micromorphology of soils, and mappings, in a typical soil surveys, showed in this review.

Keywords: Cryosols, Gelisols, ornithogenic soils.

1. INTRODUÇÃO

A Antártica representa um ambiente peculiar para formação de solos e estudo de muitos de seus processos, alguns dos quais possuem características atípicas (Campbell e Claridge, 1987). A formação dos solos está intimamente relacionada à história glacial e evolução de superfícies, à geologia, e ao intemperismo, principalmente físicos. Incluem também nos processos pedogenéticos a extensão e significância de fatores biológicos, como a ornitogênese/fosfatização (Tatur e Myrcha, 1989; Tatur, 2002; Schaefer et al., 2004; Michel et al., 2006; Simas et al., 2007; Schaefer et al., 2008; Simas et al., 2008; Pereira et al., 2013), além de características como a solifluxão e crioturbação, envolvendo congelamento e descongelamento do perfil. Black (1973) considerou que estas mudanças termais na Antártica são mais frequentes do que em qualquer outra região do mundo.

Em razão de possuir os climas mais frios e secos do planeta, a Antártica apresenta pouca água no solo, restrita a curtos períodos no verão. A água é, portanto, pouco disponível para a formação do solo, sendo o clima, muito árido em algumas regiões, capaz de dificultar ou mesmo inibir a pedogênese, os processos geomórficos, e as reações químicas (Campbell e Claridge, 1987).

A parte menos fria do continente é a Península Antártica e ilhas adjacentes, onde se concentram os trabalhos de pesquisa do Núcleo Terrantar, vinculado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera ó INCT. Em comparação ao arquipélago das Shetlands do Sul, Hope Bay, na Península Antártica, apresenta médias de temperatura mais baixas ao longo do ano, além de menor precipitação, o que possivelmente limita a atividade pedogenética e biológica em relação às ilhas.

A ocorrência de permafrost é contínua em toda a área de Hope Bay, com setores isolados, no centro e margens da área, ricos em gelo (SCAR, 2002; Martín-Serrano et al., 2005). O desenvolvimento da camada ativa e processos de *thermokarst* nestas áreas são determinados pelas condições climáticas no verão e pelo gelo superficial interconectado com água superficial e subsuperficial, sendo a evolução do permafrost nestes setores um sensível indicador de mudanças climáticas recentes e modificações do ambiente.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Núcleo Terrantar: estudos pedológicos

Estudos pedológicos na Antártica realizados por brasileiros iniciaram em 2002 com o então Projeto Criossolos, atual Núcleo Terrantar, vinculado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera ó INCT, sendo que todas as atividades científicas no continente, numa esfera maior, compõem a Rede de Pesquisa do PROANTAR (CNPq/MMA/Forças Armadas do Brasil).

Os trabalhos do Terrantar se iniciaram na Baía do Almirantado - Ilha Rei George, onde está localizada a Estação Antártica Comandante Ferraz, que teve 70 % de suas construções consumidas por um incêndio no ano de 2012.

Da Baía do Almirantado, as pesquisas de solos foram se expandindo ao longo das Ilhas Shetlands do Sul e Península Antártica, sendo Hope Bay, no extremo norte da Península, o primeiro trabalho efetivamente realizado no Continente Antártico pelo Núcleo (Figura 1).

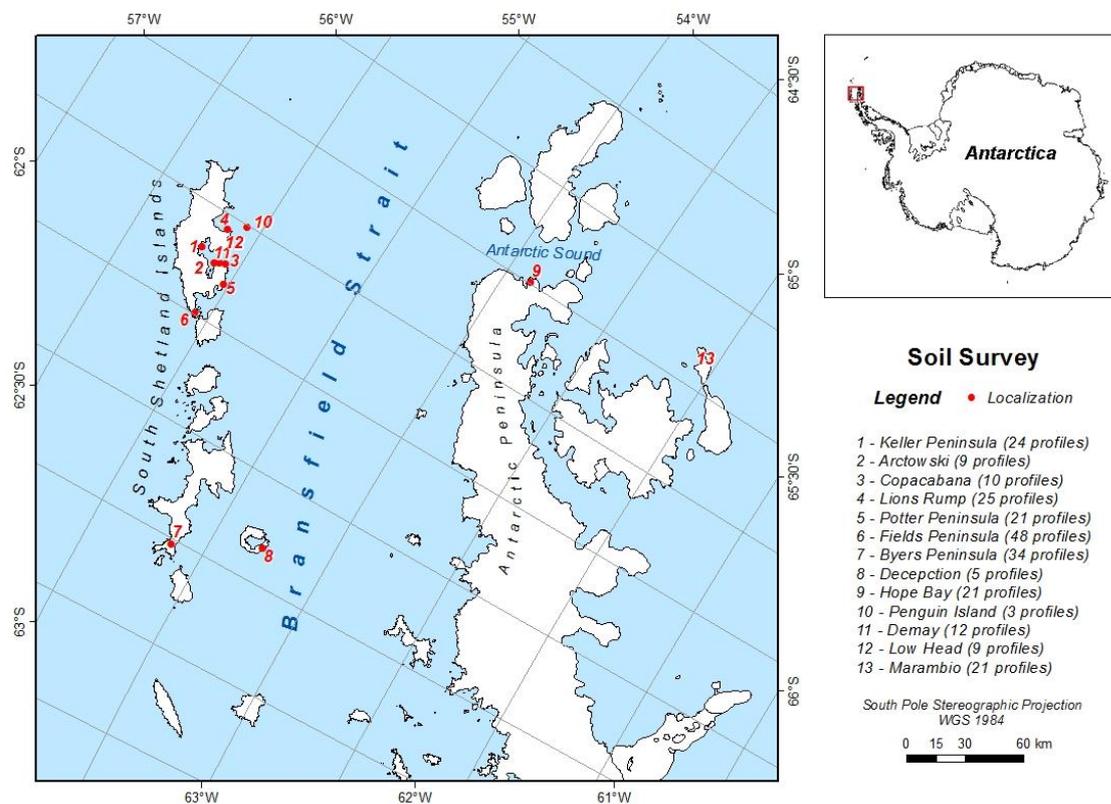


Figura 1 Localização das pesquisas de solos realizadas pelo Núcleo Terrantar na Antártica.

Mais recentemente foram realizados estudos de solos em Marambio (Ilha Seymour) e Montanhas Ellsworth, estas últimas localizadas no extremo sul da Península Antártica.

Diversos trabalhos foram produzidos envolvendo as características morfológicas, físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas dos solos, além de mapeamentos, em trabalhos típicos de pedologia e levantamentos de solos. Foram produzidos também estudos específicos sobre o processo de ornitogênese/fosfatização de solos, dinâmica do carbono, indicadores bioquímicos de metais pesados e contaminantes antrópicos, química das águas de degelo, estudos de comunidades vegetais e ecologia microbiana, zonamento ambiental, geomorfologia periglacial, e monitoramento do regime térmico da camada ativa e permafrost, numa complexa rede de sensores e registradores automáticos instalados em todas as áreas estudadas.

2.2. Solos afetados por permafrost

Solos afetados por permafrost são encontrados nas regiões árticas e subárticas, em altas montanhas e nas regiões livres de gelo da Antártica. Abrangem cerca de 13 % da cobertura terrestre (Bockheim et al., 1994), e passaram, nos últimos tempos, a despertar grande interesse por serem fontes de gás, óleo e outros combustíveis fósseis (Bockheim e Tarnocai, 1998), além de serem importantes estocadores de C e água doce.

A definição de permafrost inclui toda camada de solo, sedimento ou rocha que permanece $\geq 0^{\circ}\text{C}$ por no mínimo dois anos consecutivos (IUSS Working Group WRB, 2007), o que significa que a umidade para a formação de água ou gelo não necessita estar presente.

De acordo com Tarnocai (2004), solos afetados por permafrost possuem condições únicas, com propriedades físicas, químicas e biológicas diferentes daquelas encontradas em outros solos, o que estimula a compreensão sobre os processos de formação, classificação, relações ecológicas, uso e manejo, além da distribuição.

Atualmente, é inegável a influência do permafrost sobre os recursos hídricos, propriedades do solo, e desenvolvimento da vegetação em áreas periglaciais (Guglielmin et al., 2008). Além destes, uma série de questões estão relacionadas às mudanças no balanço de carbono, especialmente devido à liberação de CH_4 e CO_2 , em reflexo à degradação do permafrost pelo aumento de temperatura (Osterkamp, 2003; Michel et al., 2006; Slaymaker e Kelly, 2007). Um modelo de estimativa climática (Mearns e Hirst, 1999) sugere um aumento equivalente a 4 % do total das emissões de CO_2 no século XXI em virtude do descongelamento do permafrost. No entanto, o aumento da rede de produção primária pela maior exposição do solo e temperatura pode, em um efeito reverso, estimular o sequestro de carbono e reduzir ou mesmo balancear o carbono que foi emitido. Sem contar na possibilidade de maior precipitação dos carbonatos oceânicos, amplamente apontados nas discussões sobre aquecimento global.

Pesquisas de solos afetados por permafrost começaram na Rússia, em 1906. No entanto, nas áreas livres de gelo da Antártica, ainda são incomuns os estudos e mapeamentos de solos (Goryachkin, 2004), a inferir-se pela distribuição dos solos mundiais (World Soil Resources - FAO, 2003; Global Soil Regions - NRCS, 2005), que não contemplam o continente com nenhuma classe de solo atribuída às legendas. E dentre todas as regiões da Antártica, a Antártica Marítima ainda representa uma das áreas menos conhecidas em termos de estudos de solos e permafrost (Tatur, 1989; Bockheim e Ugolini, 1990; Schaefer et al., 2004; Michel et al., 2006; Simas et al., 2008).

Na década de 1980, a Associação Internacional do Permafrost (IPA) e a União Internacional de Ciência do Solo formaram o *Cryosol Working Group*, que iniciou os esforços para melhorar a classificação dos solos com permafrost. Desses esforços surgiram as classes dos *Gelisols* (Soil Survey Staff, 2010) e *Cryosols* (IUSS Working Group WRB, 2007).

Nos ambientes de permafrost, cada efeito (energia e equilíbrio de massa) é manifestado ao longo da camada ativa, que é a camada de solo sobrejacente ao permafrost (Tarnocai, 2004). Para a Antártica Marítima, temperaturas não tão baixas e maior disponibilidade de água resultam em um aprofundamento desta camada, favorecendo a cobertura vegetal e o intemperismo mineral (Campbell e Claridge, 1987; Blume et al., 2004; Guglielmin et al., 2008), refletindo em solos com maiores teores de partículas finas (silte + argila), comparativamente aos solos dos desertos polares (Pereira et al., 2013).

Na camada ativa, ciclos contínuos de congelamento e descongelamento favorecem a solifluxão e a formação de feições típicas, como solos com padrões (*patterned grounds*) (Bockheim e Tarnocai, 1998; Tarnocai et al., 2004). Além destas, horizontes quebrados ou irregulares, orientação vertical de rochas dentro do perfil, movimentação e incorporação de materiais orgânicos em subsuperfície, formação de revestimentos silto-argilosos e expulsão de materiais mais finos para a superfície (*frost heave*) são comumente observados (Pereira et al., 2013). Configuram-se desta forma os horizontes crioturbadados, definidos como aqueles que são irregulares ou quebrados, contendo materiais incorporados de outros horizontes, e mostrando ordenamentos verticais e horizontais (Aceccs, 1987).

A crioturbação, que é dominante em regiões de permafrost e se refere a todo movimento de solo causado por ação do congelamento/descongelamento (Bryan, 1946; Tarnocai e Zoltai, 1978; Washburn, 1980; French, 1996), inclui grandes modificações na morfologia e micromorfologia dos solos, tais como a formação de estrutura granular ovoide dos Criossolos, atribuída ao congelamento/descongelamento diferencial e ultradissecção de partículas finas de solo durante processos de congelamento (Schaefer et al., 2004; van Vliet-Lanöe et al., 2004).

De modo geral, a crioturbação é favorecida, mas não restrita, a condições de drenagem imperfeita, material parental siltoso, ciclos frequentes de congelamento-descongelamento, e permafrost dentro de 1 m da superfície (Washburn, 1980; Vandenbergue, 1988). Dois modelos têm sido empregados para explicar o processo de crioturbação (Vandenbergue, 1988). O modelo ôcrioestáticoö envolve duas frentes de congelamento movendo em direções opostas, para baixo da superfície e para cima do *permafrost table*, causando pressão nos materiais descongelados presentes entre as frentes de congelamento. No modelo de ôequilíbrio de células convectivasö, um processo de ascensão-subsidência no topo da camada ativa produz uma rede com movimentos de material para cima e para baixo. Este processo de ascensão-subsidência se combina para produzir um tipo lento de célula de circulação cuja tendência é a ascensão (Mackay, 1980), sendo este processo um dos responsáveis pela configuração dos solos com padrões (polígonos, círculos, estrias, etc).

A crioturbação é usada em nível categórico alto nos modernos sistemas taxonômicos para diferentes solos que contenham permafrost. Sendo assim, é essencial que taxonomistas de solos sejam capazes de identificar feições de crioturbação para classificar solos afetados por permafrost (Bockheim e Tarnocai, 1998). De acordo com os autores, os processos criopedogênicos, incluindo a crioturbação, representam processos típicos e dominantes na formação de solos afetados por permafrost.

2.3. Antártica no cenário do aquecimento global

As quatro maiores regiões da Criosfera no mundo são: Antártica, Oceano Ártico, as neves extrapolares e os ambientes montanhosos muito frios (Slaymaker e Kelly, 2007). Mudanças na Criosfera em resposta ao aquecimento global são prováveis de serem observadas inicialmente em zonas de transição, em torno das extremidades de geleiras e camadas de gelo, e em áreas de permafrost, ambientes que em contrapartida, influenciam, mesmo que indiretamente, todas as superfícies da Terra (Tedrow, 2004; Slaymaker e Kelly, 2007).

Na Antártica, o manto de gelo que a recobre, com cerca de 14 milhões de km² e espessura que supera os 4000 m em alguns locais, correspondendo a um volume de aproximadamente 30 milhões de km³, notabiliza-se por conter aproximadamente 75 % da água doce do mundo (Campbell e Claridge, 1987; Slaymaker e Kelly, 2007). De acordo com Rocha-Campos e Santos (2001), a expressividade do gelo na Antártica faz deste continente o maior ôsorvedouroö de calor da Terra, influenciando profundamente as condições climáticas, a circulação das águas oceânicas e a atmosfera terrestre.

O debate sobre a possibilidade da ocorrência de aumento da temperatura global causado pelos gases do efeito estufa despertou atenção de pesquisadores sobre o estado de equilíbrio das grandes massas de gelo e permafrost presentes na Antártica.

Estimativas indicam que o derretimento do manto de gelo austral provocaria uma elevação de até 60 m no nível do mar, com consequências catastróficas sobre a vida das populações litorâneas (Rocha-Campos e Santos, 2001). A média global do nível do mar subiu entre 0,1 e 0,25 m nos últimos 100 anos (Houghton et al., 1996). Projeções otimistas de mudanças futuras até 2100 são de acréscimo de 1 m no nível dos oceanos (National Geographic, 2007).

No inverno antártico, a área de flutuação de gelo ao redor do continente (17-20 milhões de km²) é maior que o gelo do próprio continente. Neste caso, uma esperada redução desta cobertura de mar congelado, em resposta ao aquecimento global, possivelmente provocará uma maior absorção da radiação solar (Setzer et al., 2004). Na Península Antártica são esperadas mudanças pela maior exposição de rochas e solos, com alterações na ecologia, especialmente com a introdução de plantas exóticas e animais (Slaymaker e Kelly, 2007).

A neve, também responsável pela regulação da temperatura na Antártica, reflete aproximadamente 80 % da radiação do sol. Em comparação, solo exposto e vegetação absorvem aproximadamente oito vezes mais radiação do que uma cobertura de neve (Slaymaker e Kelly, 2007). Neste caso, quantidades de solo cobertos por neve são criticamente importantes para o balanço de radiação terrestre e também para os sistemas climáticos globais. Além disso, neve e gelo também funcionam como isolantes, pela baixa condutividade térmica, se comparada com superfícies de solo.

Estudos em crioconitas, partículas escuras de poeira glacial inicialmente identificadas pelo explorador sueco A. E. Nordenskjöld em 1870, foram apontados mais recentemente como de grande interesse para a comunidade científica, sobretudo relacionados com sua composição e impactos nos glaciares e coberturas de neve (Schwartzman e Tedesco, 2011). Podem surgir *in situ*, a partir de quebras de rochas na superfície do gelo ou liberação de detritos presos dentro de glaciares, a partir do derretimento, ou mesmo transportadas por sistemas de circulação atmosférica global.

A crioconita se destaca em dois aspectos: primeiro por formar sistemas biológicos isolados, de grande interesse para estudos de desenvolvimento de ecossistemas; e segundo e mais importante para o presente trabalho, relacionado ao decréscimo no albedo, maior absorção de energia e derretimento de gelo e neve. Assim, quando agregados de crioconita passam a formar buracos nos glaciares e coberturas de neve, pela redução drástica do albedo, um efeito é o aumento na ablação (Takeuchi, 2002). Fountain et al. (2004) apontam que buracos formados pela crioconita no Glaciar Canadá (*McMurdo Dry Valleys* ó Antártica) contribuíram com 13 % do total do *runoff* do glaciar, apesar de cobrir apenas 4,5 % deste.

Schwartzman e Tedesco (2011), em trabalho comparativo com partículas de crioconita coletadas na Antártica e Groenlândia, apontam para um maior tamanho e maior potencial deteriorativo das partículas na Antártica, que possuem baixa reflectância influenciada principalmente pela constituição mineralógica. Tal fato é compreensível uma vez que na Antártica partículas menores tem forte ligação com a litologia em virtude do forte efeito crioclástico na redução de seus tamanhos.

2.4. Criossolos (Gelissolos) Ornitogênicos

A formação e duração de ecossistemas terrestres fortemente enriquecidos pelo aporte de dejetos animais têm sido relatada nos eventos geológicos. A disponibilidade restrita de áreas costeiras livres de gelo e a queda na reprodução durante a última glaciação reduziram o número de vertebrados marinhos nos solos antárticos, sendo que alguns autores consideram menor a redução das populações de pinguins, especialmente *Pygoscelis adeliae* e *Pygoscelis papua*, neste período devido à maior adaptação fisiológica destas espécies (Tatur e Myrcha, 1989; Tatur, 2002). O processo de deglaciação, com mudança na extensão dos bancos de gelo, seguida pela elevação glacio-isostática das terras durante o Holoceno, determinou o acesso dos vertebrados marinhos às terras durante os verões (Baroni e Orombelli, 1994).

Nos curtos períodos de verão, ocorrem nos ambientes terrestres, interações que influenciam diretamente as relações tróficas e rotas de transferência de matéria e energia entre o oceano e as áreas costeiras na Antártica (Rakusa-Suszczewski, 1993). Nestes locais, existe grande aporte de materiais orgânicos (guano, urina, penas, casca de ovos, restos animais/vegetais e conchas) depositados por aves e mamíferos, com destaque para os pinguins, sendo a incorporação destes materiais orgânicos à matriz mineral do solo a principal influência na caracterização dos solos ornitogênicos (Tatur e Myrcha, 1989; Tatur e Myrcha, 1993), termo que tem sido amplamente utilizado na literatura (Tedrow e Ugolini, 1966; Allen e Heal, 1970; Ugolini, 1970; Ugolini, 1972; Tedrow, 1977; Campbell e Claridge, 1987; Bockheim e Ugolini, 1990; Blume et al. 1997; Schaefer et al., 2004; Pereira et al., 2013). De acordo com Rakusa-Suszczewski (1980), cada população de pinguim na Antártica (entre 30.000 e 50.000 casais) deposita em torno de 6,35 t de excreta no solo diariamente (comparativamente, todos os pássaros voadores depositam apenas 0,14 t), sendo que a intensidade de aporte nas pinguineiras chega a 10 kg m⁻² de excreta durante uma estação. Segundo Ugolini (1972), isto representa a mais abundante fonte de matéria orgânica nos ecossistemas terrestres antárticos.

Considerando somente a população de pinguins da Antártica Marítima, o depósito anual atinge aproximadamente 1,11 t de excreta no solo (Myrcha e Tatur, 1991). Porém, ao contrário das áreas secas do mundo, onde o guano depositado é acumulado, a maioria dos nutrientes carregados para as terras por pinguins rapidamente retornam ao mar como guano em suspensão parcialmente mineralizado. Desse montante, sob condições favoráveis, mais de 11 % do fósforo depositado pode permanecer no solo (Myrcha et al., 1991), indicando que nesta transferência, a concentração e aumento do *turnover* podem ser importantes para a produtividade, estrutura e distribuição dos ecossistemas costeiros pobres em nutrientes.

Nas áreas extremamente frias e áridas da Antártica, a deposição do guano aparentemente tem pouca influência na alteração dos minerais (Ugolini, 1972). No entanto, sob as condições climáticas úmidas da Antártica Marítima, a intensa crioturbação e percolação de água incorporam detritos de aves em profundidade no perfil. Lixiviados ricos em P nestes sistemas reagem com o substrato mineral em um complexo processo de fosfatização do solo, primeiramente descrito por Tatur e Barczuk (1985) e recentemente estudado por Schaefer et al. (2004), Michel et al. (2006), Simas et al. (2006), Simas et al. (2007) e Pereira et al. (2013). Assim, o fósforo, neste processo, ocorre em zonas de rochas fosfatizadas como Ca-fosfato e Fe-Al-fosfato, formados pela ação de soluções quimicamente reativas liberadas pelo intemperismo dos depósitos fosfáticos (incluindo o guano) sobre a rocha. Estas feições são muito observadas em superfícies rochosas mais susceptíveis à alteração, como basaltos e calcários, em detrimento de granitos e quartzitos (Tatur, 2002).

Nestes solos é observada a ocorrência de diversos minerais de argila fosfatados, incomuns em solos de outros ambientes naturais do planeta (Tatur e Myrcha, 1989; Tatur, 2002), apesar de terem sido encontrados também em ilhas oceânicas brasileiras a partir do aporte de materiais orgânicos depositados por aves (Oliveira et al., 2010).

Schaefer et al. (2008), por meio de microscopia eletrônica de varredura (WDS), observou feições de iluviação particulares do processo de fosfatização em ambiente criogênico, com intensa mobilidade de P e neoformação de minerais secundários fosfatados como taranakita, minyulita e leucofosfita. Uma estrutura granular, sub-arredondada composta por partículas de silte rodeadas por fosfato iluvial são típicas nos horizontes ornitogênicos (Simas et al., 2007). Em trabalho com extrações sequenciais de P em solos da Baía do Almirantado, estes autores observaram que fases moderadamente lábeis de Al-P e Fe-P são as principais frações dos sítios estudados. Estes fatos corroboram com Simas et al. (2006) que mostraram que a maior parte da fração argila em alguns solos ornitogênicos é composta por fosfatos de Fe e Al, com alta participação de formas pouco cristalinas e orgânicas.

Simas et al. (2006) observaram que fosfatos cristalinos ocorrem somente em solos diretamente afetados por pinguins (pinguineira ativa e abandonada). A dissolução incongruente de fosfatos cristalinos de Al-Fe com formação de fases amorfas ricas em P é considerada a mais comum transformação na medida em que aumenta a idade dos sítios abandonados (Tatur et al., 1997) e mantém elevados os níveis de formas de P-lábil. Em contrapartida, nos sítios sob influência indireta dos pinguins, a entrada de P é baixa e nenhum fosfato cristalino está presente. Assim, as características químicas destes sítios são controladas por P minerais altamente reativos e não cristalinos.

Solos ornitogênicos distinguem-se claramente daqueles não ornitogênicos por várias características, como baixo pH (devido ao alto grau de nitrificação) e saturação por bases; teores muito elevados de P (Mehlich-1), Al trocável, COT e N total. O conteúdo de partículas finas (silte + argila) são usualmente mais baixos, possivelmente devido à destruição de aluminossilicatos por acidólise, que ocorre nestes solos pela decomposição microbiana do guano fresco, gerando ácido nítrico e sulfúrico (Tatur et al., 1997). Apresentam clara diferenciação entre horizontes, sendo o horizonte A relativamente profundo e rico em matéria orgânica (formando um epipedon umbrico), e horizonte B fosfático (discretamente acinzentado e amarelado) (Simas et al., 2007).

Em alguns destes solos, observa-se o desenvolvimento de oásis com extensa e contínua cobertura vegetal, nos quais se verificam maior atividade microbiológica em termos de solos antárticos (Tatur et al., 1997; Michel et al., 2006).

Nas pinguineiras ativas, a contínua deposição do guano fresco e o pisoteio das aves inibe o estabelecimento da vegetação (Tatur, 1989; Tatur et al., 1997). Nos solos localizados próximos a estas pinguineiras ativas, ou naquelas abandonadas, a influência ornitogênica e o reflexo na cobertura vegetal são bastante pronunciados, com possível formação de um horizonte superficial humificado, distinguido por uma coloração escura e relações C/N e C/P mais altas do que em materiais ornitogênicos (Tatur et al., 1997). Nestas áreas a colonização inicia-se com a formação de uma cobertura de *Prasiola crista* (algae). Normalmente em posições mais altas da paisagem, antigas pinguineiras são hoje muito colonizadas por líquens, briófitas, e por duas espécies superiores: *Deschampsia antártica* (gramineae) e *Colobanthus quitensis* (cariofilaceae).

Em função de sua distribuição geográfica limitada, sítios ornitogênicos são extremamente importantes e constituem o mais importante locus de sequestro de C nos ecossistemas terrestres antárticos (Michel et al., 2006; Simas et al., 2007; Pereira et al., 2013), já que embora a produção de biomassa pela vegetação antártica seja relativamente baixa, ela frequentemente excede a capacidade de decomposição da microbiota local (Ugolini, 1972).

Pouco são os conhecimentos a respeito da dinâmica do C nos solos antárticos e qual seu papel no ciclo global do C, comparativamente a solos de outros ecossistemas (Michel et al., 2006). Segundo os autores, um entendimento do ciclo do C nos solos ornitogênicos da Antártica é importante para a compreensão dos efeitos do aquecimento global nos ambientes costeiros deste continente. Ácidos húmicos extraídos de Criosolos Ornitogênicos da Antártica Marítima são ricos em N e são facilmente termo-degradados, sugerindo que estes solos sejam vulneráveis à perda de C para a atmosfera em resposta ao aquecimento global (Michel et al., 2006).

Além dos pinguins, outras espécies também contribuem para o processo de ornitogênese, no entanto de fraca intensidade, como as skuas, petréis e gaivotões (Simas et al., 2007). Observa-se desenvolvimento de vegetação em áreas mais distantes da costa próximo a ninhas destas aves, indicando a importância da fertilização dos solos por estes animais, e reflexo no estabelecimento de comunidades vegetais mais complexas e com maior capacidade de fixação de C (Michel et al., 2006).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey ó ACECSS. 1987. The Canadian System of Soil Classification. 2nd ed. Publ. 1646. Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa. 164p.

Allen, S.E.; Heal, O.W. 1970. In: Holdgate, M.W. (Ed.). Soils of the Maritime Antarctic Zone. Antarctic Ecology, Academic Press, Inc, NY, v.2, p.693-696.

Baroni, C.; Orombelli, G. 1994. Abandoned penguin rookeries as Holocene paleoclimatic indicator in Antarctica. *Geology*, v.22, p.23-26.

Black, R.F. 1973. Cryomorphic processes and micro-relief features, Victoria Land, Antarctica. In: Fahey, B.D.; Thompson, R.D. (Eds.). *Research in Polar and Alpine Geomorphology*, GeoAbstracts, Norwich. p.11-24.

Blume, H.P.; Beyer, L.; Bölter, L.; Erlenheuser, H.; Kalk, E.; Kneesch, S.; Pfisterer, U.; Schneider, D. 1997. Pedogenic zonation in soils of Southern circumpolar region. *Adv. GeoEcol*, v.30, p.69-90.

Blume, H.P.; Chen, J.; Kalk, E.; Kuhn, D. 2004. Mineralogy and weathering of Antarctic Cryosols. In: Kimble, J.M. (Ed.). *Cryosols: Permafrost-Affected Soils*, Springer-Verlag, Berlin. p.415-426.

Bockheim, J.C.; Ping, C.L.; Moore, J.P.; Kimble, J.M. 1994. Gelisols: A new proposed order for permafrost-affected soils. In: Kimble, J.M.; Ahrens, R. (Eds.). *Proc. Meeting on Classification, Correlation, and Management of Permafrost-Affected Soils*. Alaska (USA). USDA, Soil Conservation Service, Washington, D.C. p.25-45.

- Bockheim, J.G.; Tarnocai, C. 1998. Recognition of cryoturbation for classifying permafrost-affected soils. *Geoderma*, v.81, p.281-293.
- Bockheim, J.G.; Ugolini, F.C. 1990. A review of pedogenic zonation in well-drained soils of the southern circumpolar region. *Quaternary Research*, v.34, p.47-66.
- Bryan, K. 1946. Cryopedology: the study of frozen ground and intensive frost action with suggestion on nomenclature. *Am. J. Soil Sci.*, v.244, p.622-642.
- Campbell, I.B.; Claridge, G.G.C. 1987. *Antarctica: Soils, Weathering Processes and Environment*, Elsevier-Amsterdam.
- Food and Agriculture Organizations of the United Nations ó FAO. 2003. *World Soil Resources: revised legend with corrections*. ISIRIC, Wageningen.
- Fountain, A.G.; Tranter, M.; Nysten, T.H.; Lewis, K.J.; Mueller, D.R. 2004. Evolution of cryoconite holes and their contribution to meltwater runoff from glaciers in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *J. Glaciol.*, v.50, p.35-45.
- French, H.M. 1996. *The Periglacial Environment*. Longman, New York, 341 p.
- Goryachkin, S.V. 2004. The history of research of polar soil: Introduction. In: Kimble, J.M. (Ed.). *Cryosols: Permafrost-Affected Soils*. Berlin: Springer-Verlag, 2004, p. 3-5.
- Guglielmin, M.; Evans, C.J.E.; Cannone, N. 2008. Active layer thermal regime under different vegetation conditions in permafrost areas. A case study at Signy Island (Maritime Antarctica), *Geoderma*, v.144, p.73-85.
- Houghton, J.T.; Meira Filho, L.G.; Callander, B.A.; Harris, N.; Kattenberg, A.; Maskell, K. (Eds.). 1996. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IUSS Working Group WRB. 2007. *World Reference Base for Soil Resources 2006, First Update 2007*. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- Mackay, J.R. 1980. The origin of hummocks. Western Arctic Coast, Canada. *Can. J. Earth Sci.*, v.13, p.889-897.
- Martín-Serrano, A.; Montes, M.; Nozal, F.; del Valle, R.A. 2005. Geomorfología de la costa austral de Bahía Esperanza (Península Antártica). *Geogaceta*, v.38, p.95-98.
- Matear, R.J.; Hirst, A.C. 1999. Climate change feed-back on the oceanic CO₂ uptake. *Tellus 51B*, p.722-733.
- Michel, R.F.M.; Schaefer, C.E.G.R.; Dias, L.; Simas, F.N.B.; Benites, V.; Mendonça, E.S. 2006. Ornithogenic Gelisols (Cryosols) from Maritime Antarctica: pedogenesis, vegetation and carbon studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.70, p.1370-1376.
- Myrcha A.; Ochyra, R.; Tatur, A. 1991. Site of Special Scientific Interest no.8, Western shore of Admiralty Bay, King George Island, South Shetland Islands. In: Klekowski, K.S.; Opaliński, K.W. (Eds.). *First PolishóSoviet Antarctic Symp. Arctowski 85*. Institute of Ecology Publ. Office, Warsaw, p.157-168.
- Myrcha A.; Tatur, A. 1991. Ecological role of current and abandoned penguin rookeries in the land environment of the Maritime Antarctic. *Polish Polar Research*, v.12, p.3-24.
- National Geographic Brasil. 2007. *Permafrost: paisagem de terra e gelo*. Ed. Abril, n.93, p.116-131.
- National Resources Conservation Service ó NRCS. 2005. *Soil Survey Division. Global Soil Regions*.
- Oliveira, F.S., Abrahão, W.A.P., Schaefer, C.E.G.R., Simas, F.N.B. 2010. Implicações geomorfológicas e paleogeográficas das crostas fosfáticas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Norte. *R. Esc. Minas*, v.63, p.239-246.
- Osterkamp, T.E. 2003. Establishing long-term permafrost observatories for active-layer and permafrost investigations in Alaska: 1977-2002. *Permafrost and Periglacial Processes*, v.14, p.331-342.
- Pereira TTC, Schaefer CEGR, Ker JC, Almeida CC, Almeida ICC, Pereira, AB. 2013. Genesis, mineralogy and ecological significance of ornithogenic soils from a semi-desert polar landscape at Hope Bay, Antarctic Peninsula. *Geoderma*, v.209ó210,

p.986109.

Rakusa-Suszczewski, S. 1993. The Maritime Antarctic coastal ecosystem of Admiralty Bay. Department of Antarctic Biology. Polish Academy of Sciences, Warsaw.

Rakusa-Suszczewski, S. 1980. The role of near-shore research in gaining and understanding of the functioning of Antarctic ecosystem. *Pol Arch Hydrobiol*, v.27, p.229-233.

Rocha-Campos, A.C.; Santos, P.R. 2001. Ação geológica do gelo. In: Teixeira, W. et al. (Eds.). *Decifrando a Terra*. Oficina de Textos, São Paulo, 568p.

Scientific Committee on Antarctic Research ó SCAR. 2002. Management Plan for Antarctic Specially Protected Area No. 148. Mount Flora, Hope Bay, Antarctic Peninsula. CEP draft.

Schaefer, C.E.G.R.; Simas, F.N.B.; Albuquerque-Filho, M.R.; Michel, R.F.M.; Viana, J.H.M.; Tatur, A. 2004. Fosfatização: Processo de formação de solos na Baía do Almirantado e implicações ambientais. In: Schaefer, C.E.G.R.; Francelino, M.R.; Simas, F.N.B.; Albuquerque-Filho, M.R. (Eds.). *Ecosistemas Costeiros e Monitoramento Ambiental da Antártica Marítima, Baía do Almirantado, Ilha Rei George*. NEPUT ó Dep. de Solos, Viçosa, p.47-59.

Schaefer, C.E.G.R.; Simas, F.N.B.; Gilkes, R.J.; Mathison, C.; Costa, L.M.; Albuquerque, M.A. 2008. Micromorphology and microchemistry of selected Cryosols from Maritime Antarctica. *Geoderma*, v.144, p.1046115.

Schwartzman, T.; Tedesco, M. 2011. Comparative analysis of Greenland and Antarctic cryoconite. *J. Student Research*, v.4, p.19-24.

Setzer, A.W.; Oliveira, M.R.; Francelino, M.R.; Schaefer, C.E.G.R.; Costa, L.M.; Bremer, U.F. 2004. 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. (Eds.). *Ecosistemas Costeiros e Monitoramento Ambiental da Antártica Marítima, Baía do Almirantado, Ilha Rei George*. NEPUT ó Dep. de Solos, Viçosa, p.1-7.

Simas, F.N.B.; Schaefer, C.E.G.R.; Albuquerque-Filho, M.R.; Francelino, M.R.; Fernandes Filho, E.I.; Costa, L.M. 2008. Genesis, properties and classification of Cryosols from Admiralty Bay, Maritime Antarctica. *Geoderma*, v.144, p.1166122.

Simas, F.N.B.; Schaefer, C.E.G.R.; Melo, V.F.; Albuquerque-Filho, M.R.; Michel, R.F.M.; Pereira, V.V.; Gomes, M.R.M.; Costa, L.M. 2007. Ornithogenic Cryosols from Maritime Antarctica: phosphatization as a soil forming process. *Geoderma*, v.138, p.191-203.

Simas, F.N.B.; Schaefer, C.E.G.R.; Melo, V.F.; Guerra, M.B.B.; Saunders, M.; Gilkes, R.J. 2006. Clay-sized minerals in permafrost-affected soils (Cryosols) from King George Island, Antarctica. *Clays and Clay Minerals*, v.54, p.721-736.

Slaymaker, O.; Kelly, R.E.J. 2007. *The cryosphere and global environmental change*. Blackwell Publishing, 261p.

Soil Survey Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*, 11th ed. USDA-NRCS, Washington, D.C.

Takeuchi, N. 2002. Optical characteristics of cryoconite (surface dust) on glaciers: the relationship between light absorbency and the property of organic matter contained in the cryoconite. *Ann. Glaciol.*, 34.

Tarnocai, C. 2004. Cryosols of Arctic Canada. In: Kimble, J.M. (Ed.). *Cryosols: Permafrost-Affected Soils*. Springer-Verlag, Berlin, p.956119.

Tarnocai, C.; Broll, G.; Blume, H.P. 2004. Classification of permafrost-affected soils in the WRB. In: Kimble, J.M. (Ed.). *Cryosols: Permafrost-Affected Soils*. Springer-Verlag, Berlin, p.6376657.

Tarnocai, C.; Zoltai, S.C. 1978. Earth hummocks of the Canadian arctic and subarctic. *Arct. Alp. Res.*, v.10, p.343-352.

Tatur, A. 2002. Ornithogenic Ecosystems in the Maritime Antarctic ó Formation, Development and Disintegration. In: Beyer, L.; Bölter, M. (Eds.). *Geoecology of Antarctic Ice-Free Coastal Landscape*. Ecological Studies. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, v.154, p.161-184.

Tatur, A. 1989. Ornithogenic soils of the Maritime Antarctic. *Polish Polar Research*, v.4, p.481-532.

- Tatur, A.; Barczuk, A. 1985. Ornithogenic phosphates on King George Island, Maritime Antarctic. In: Siegfried, W.R.; Condy, P.R.; Laws, R.M. (Eds.). *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs*. Springer-Verlag, Berlin, p.163-169.
- Tatur, A.; Myrcha, A. 1989. Soils and vegetation in abandoned penguin rookeries. *Proc. NIPR Symp. Polar Biol.*, v.2, p.181-189.
- Tatur, A.; Myrcha, A. 1993. Ornithogenic soils. In: Rakusa-Suszczewski, S. (Ed.). *The Antarctic Coastal Ecosystem of Admiralty Bay*. Polish Academy of Sciences, Warsaw, p.161-165.
- Tatur, A.; Myrcha, A.; Niegodzisz, J. 1997. Formation of abandoned penguin rookery ecosystems in the Maritime Antarctic. *Polar Biology*, v.17, p.405-417.
- Tedrow, J.C.F. 2004. Soil research in Arctic Alaska, Greenland, and Antarctica. In: Kimble, J.M. (Ed.). *Cryosols: Permafrost-Affected Soils*. Springer-Verlag, Berlin, p.5617.
- Tedrow, J.C.F. 1977. *Soils of the Polar Landscapes*. Rutgers University Press, New Brunswick, 638p.
- Tedrow, J.C.F.; Ugolini, C. 1966. Antarctic soils. In: Tedrow, J.C.F. (Ed.). *Antarctic soils and soil forming process*. Am. Geophys. Union Antarct. Res., p.161-177.
- Ugolini, F.C. 1970. Antarctic soils and their ecology. In: Holdgate, M.W. (Ed.). *Antarctic Ecology*, Academic Press, London, v.2, p.673-692.
- Ugolini, F.C. 1972. Ornithogenic soils of Antarctica. In: Llano, G.A. (Ed.). *Antarctic Terrestrial Biology*. Am. Geophys. Union Antarct. Res., p.181-193.
- van Vliet-Lanöe, B.; Fox, C.A.; Gubin, S.V. 2004. Micromorphology of Cryosols. In: Kimble, J.M. (Ed.). *Cryosols: Permafrost-Affected Soils*. Springer-Verlag, Berlin, p.3656391.
- Vandenberghe, J. Cryoturbations. 1988. In: Clark, M.J. (Ed.). *Advances in Periglacial Geomorphology*. J. Wiley, New York, p.179-198.
- Washburn, A.L. *Geocryology*. J. Wiley, New York, 1980.