

RAQUEL DE CASTRO PORTES

**RELAÇÃO SOLO E PAISAGEM EM AMBIENTE DE ALTA MONTANHA;
CORDILHEIRA BLANCA, ANDES PERUANOS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

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

T

P843r
2014 Portes, Raquel de Castro, 1982-
Relação solo e paisagem em ambiente de alta montanha;
Cordilheira Blanca, Andes peruanos. / Raquel de Castro Portes. -
Viçosa, MG, 2014.
ix, 70f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Solos - Formação. 2. Intemperismo. 3. Parque Nacional
Huascarán. 4. Cordilheira dos Andes. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-graduação em Solos
e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 631.4

RAQUEL DE CASTRO PORTES

**RELAÇÃO SOLO E PAISAGEM EM AMBIENTE DE ALTA MONTANHA;
CORDILHEIRA BLANCA, ANDES PERUANOS**

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

APROVADA: 11 de março de 2014.

João Carlos Ker

Márcio Rocha Francelino

Fábio Soares de Oliveira

Roberto Ferreira Machado Michel

Elpídio Inácio Fernandes Filho
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço os meus pais Amasiles I. G. de Castro Portes e Manoel A. Portes Neto por tudo que fizeram por mim ao longo desta vida, pela dedicação, apoio, incentivo, carinho e amor.

Ao meu marido Diogo Noses Spinola por ser companheiro em todos os momentos, pela paciência, ajuda, carinho e amor.

À Universidade Federal de Viçosa e Departamento de Solos pela formação profissional.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos no Brasil e ao PROANTAR – MCT N ° 23/2009 pelo financiamento da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento aos Profissionais do Ensino Superior (CAPES) pela bolsa de estudos na Alemanha.

Ao professor Elpídio Inácio Fernandes Filho pelas oportunidades ao longo destes 11 anos de trabalho em conjunto, pela amizade e ensinamentos.

Ao professor Liovando Marciano da Costa pela amizade, carinho, ensinamentos, entusiasmo e disponibilidade.

Ao professor Carlos Ernesto G. R. Schaefer pela oportunidade concedida de participar do grupo TERRANTAR e realizar a pesquisa no Peru.

Ao professor João Carlos Ker, pela amizade, pela participação na viagem de campo e ensinamentos passados dentro e fora de sala de aula.

Ao Peter Kühn do departamento de Geociências da Eberhard Karls Universität Tübingen na Alemanha pela disponibilidade, ensinamentos e colaboração na pesquisa.

Ao João Santiago Reis e Wilson de Castro Portes pela colaboração e dedicação no laboratório.

À Kátia Karoline Delpupo, Henrique de Sá Paye e Marcelo Braga Bueno Guerra pelas contribuições no laboratório e ao Roberto Ferreira Machado Michel pela colaboração com a estatística e revisões.

Aos professores Ivo Ribeiro da Silva, Jaime Wilson Vargas de Mello, Maurício Paulo Ferreira Fontes, Raphael Bragança Alves Fernandes, Reinaldo Bertola Cantarutti que contribuíram com ideias ou com auxílio para realização de análises laboratoriais.

Ao Servicio Nacional de Areas Naturales Protegidas (SERNANP) e Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) do Peru nos nomes de Marco Arenas Aspigueta, Ricardo Villanueva e Martin Salvador pelo apoio logístico para realização da pesquisa no Parque Nacional Huascarán.

Ao Eduardo Osório Senra, Bruno Araujo Furtado de Mendonça e Tom Adnet Moura pela ajuda durante a expedição de campo.

Aos professor Assunción Cano Schevería e Paul González pela contribuição no trabalho de campo, amizade e apoio no Museo de História Natural da Universidad Mayor Nacional de San Marcos e a professora Maria Isabel pela hospitalidade em Lima.

Aos professores Fernando Anaya Meléndez, Mary Suni e Rosa Aguirre Medrano pela disponibilização do laboratório de química analítica da Universidad Mayor Nacional de San Marcos.

À Rosa e Chino pela hospitalidade em nos acolher em sua casa durante as expedições de campo e aos seus filhos Olegário e Álvaro pela ajuda no trabalho de campo.

Aos funcionários do Departamento de Solos, Brás, Lula, Edimaldo, Carlinhos, Mário, Geraldo Robésio, Pablo e Chico pela colaboração no laboratório.

As secretárias Cláudia Maria Gonçalves e Luciana de Castro Freitas por todo apoio durante estes anos de trabalho no Departamento de Solos e amizade.

Aos meus amigos de Viçosa Andrea Niño, Mateus de Moraes, Júlia Abrantes, Davi Gjørup, Bruno Resck, Samuel Oliveira, Lina Lobo, Giovanni Giacomini, Guilherme Alves, Joana Cavalcanti, Fernanda Matuk, Frederico Brumano, Gustavo Ferreira, Roberta Monteiro, Cecília Calhau e Tiago Torres.

Agradeço também a todos que direta ou indiretamente ajudaram na realização deste trabalho e não foram mencionados.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1	3
Pedogênese em um gradiente climático de alta montanha tropical, Cordilheira Blanca – Andes peruanos	3
Resumo	3
1. Introdução	3
2. Área de estudo	4
3. Métodos	6
3.1. Seleção das áreas para amostragem e coleta de solos.	6
3.2. Análises dos solos	6
4. Resultados.....	7
4.1. Morfologia e características físicas	7
4.2. Características químicas	14
4.3. Material de origem e análises de difração de raio-x.....	17
4.4. Classificação dos solos.....	18
5. Discussão	18
5.1. Processos pedogenéticos	18
5.2. Intensidade do intemperismo.....	23
6. Conclusão	24
7. Referências bibliográficas	25
CAPÍTULO 2	29
Regime térmico e hídrico de solos de alta montanha tropical, Cordilheira Blanca – Andes peruanos	29
Resumo	29
1. Introdução	29
2. Área de estudo	30
3. Material e métodos	31
3.1. Características dos sítios	31
3.2. Mensuração física e elaboração dos dados.....	32
4. Resultados.....	34
4.1. Médias mensal e anual da temperatura do ar e do solo	34
4.2. Regimes diários da temperatura do solo	35
4.3. Variação diária e anual das temperaturas do ar e do solo	36
4.4. Relação entre a temperatura do ar e as diferentes profundidades do solo.....	39
4.5. Umidade do solo.....	40
5. Discussão	40

6. Conclusão	49
7. Referências bibliográficas	50
CAPÍTULO 3	52
Assembleias modernas de fitólitos de alta montanha tropical, Puna peruana – Cordilheira Blanca	52
Resumo	52
1. Introdução.....	52
2. Área de estudo	53
3. Materiais e métodos.....	55
3.1. Levantamento florístico.....	55
3.2. Pré-tratamentos.....	56
3.3. Classificação e contagem dos fitólitos	56
4. Resultados.....	57
4.1. Diversidade florística das fitofisionomias	57
4.2. Assembleias de fitólitos	58
5. Discussão	62
6. Conclusão	63
7. Referências bibliográficas	63
CONCLUSÃO GERAL	66
ANEXO A - Difractometria de raio-x	68
ANEXO B - Análise elementar do material de origem	70

RESUMO

PORTES, Raquel de Castro, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2014. **Relação solo e paisagem em ambiente de alta montanha; Cordilheira Blanca, Andes peruanos.** Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho. Coorientadores: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer e Liovando Marciano da Costa.

O objetivo desta pesquisa foi estudar a relação solo e paisagem em ambiente de alta montanha tropical, na Cordilheira Blanca, Andes peruanos. O trabalho foi dividido em três capítulos. No primeiro foram avaliados processos pedogenéticos e a intensidade do intemperismo nos solos ao longo do gradiente climático entre os vales de Llanganuco (leste-seco) e Portachuelo (oeste-úmido) a partir de propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Os pedons de ambos os vales foram formados por depósitos coluviais e são esqueléticos. São fracamente desenvolvidos, apresentando os horizontes O, A, C e C/R. Compartilham também os mesmos processos de formação de solos, associados com a acumulação de matéria orgânica como humificação, melanização e formação de complexos organometálicos e os horizontes superficiais tem alta concentração de COT. De modo geral, os pedons são ácidos a ligeiramente ácidos, baixa saturação por bases, alta saturação por Al e CTC efetiva e potencial baixa. 70% dos pedons foram classificados como Umbrisols. No entanto, a intensidade do intemperismo é maior nos pedons em Portachuelo, onde alguns mostraram formação de óxidos de ferro cristalino e transformação de minerais primários (clorita) para secundários (EHE-Esmectita), demonstrando que o microclima, o material de origem e o clima regional controlaram a intensidade do intemperismo. No segundo capítulo foram avaliados o comportamento térmico e hídrico dos solos abaixo da linha de neve nas fitofisionomias Roquedal (4.835 m), Pajonal (4.705 m) e Bosque de Polylepis (4.448 m). Para isto, foram instalados sistemas de sensores e os dados foram registrados a cada hora, entre junho de 2011 a junho de 2012. Foram observados os regimes diários da temperatura do solo de dias de congelamento e descongelamento (DCD) e dias de descongelamento (DD). A sazonalidade da precipitação e o microclima controlam a frequência destes regimes. A maior frequência de DCD está relacionada com o período seco. Em contrapartida, ocorre aumento de DD no período úmido. No solo do Roquedal predominam DCD em todos os meses e no Pajonal e Bosque de Polylepis nos meses do período seco. A frequência de DD é maior no Bosque de Polylepis. Foram detectadas tendências nas amplitudes diárias da temperatura do solo influenciados pela insolação, nebulosidade e conteúdo de água. Nos períodos com amplitude térmica elevada, a umidade no solo é baixa. Em contrapartida, a amplitude térmica diminui com aumento da umidade. No entanto, para análises mais conclusivas do comportamento da temperatura e umidade do solo é necessária

uma série temporal de dados mais longa. No capítulo 3 o objetivo foi identificar espécies de plantas produtoras de fitólitos sobre solos com diferentes regimes de umidade e estabelecer e examinar assembleias modernas de fitólitos para que possam ser usadas como referência em estudos paleoambientais. Foram coletadas espécies vasculares nos mesmos sítios de monitoramento de temperatura e umidade do solo. Foram identificadas 13 espécies produtoras de fitólitos, 9 são Poaceae. As Poaceae que ocorrem nas três fitofisionomias, pertencem a sub-família Festucoid (Pooideae - com sistema fotossintético C₃) e produzem fitólitos circulares, retangulares, oblongs, rondels. O gênero *Agrostis* possui fitólitos festucóides diferenciados, sendo maiores e menos espessos. Esta pesquisa conclui que o uso dos fitólitos para distinguir as três fitofisionomias é limitado, uma vez que as assembleias de fitólitos não se diferenciam mesmo ocorrendo em solos com diferentes regimes de umidade.

ABSTRACT

PORTES, Raquel de Castro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2014. **Relationship between soil and landscape in a high mountain environment; Cordillera Blanca, Peruvian Andes.** Adviser: Elpídio Inácio Fernandes Filho. Co-advisers: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer and Liovando Marciano da Costa.

The aim of this study is to explore the relationship between the soil and landscape in the tropical high mountain environment of the Cordillera Blanca, Peruvian Andes. The thesis comprises three parts. In the first part, the pedogenic processes and weathering intensity of soils is evaluated based on physical, chemical and mineralogical properties, across a climatic gradient from the drier Llanganuco Valley in the east to the wetter Portachuelo Valley in the west. The pedons were formed by colluvial deposits and are skeletal in both valleys. They are weakly developed, with O, A, C and C/R horizons. They also show the same soil forming processes, mainly those linked with organic matter such as humification, melanization and organometallic complexes and the surficial horizons have high TOC concentration. Generally, the pedons are acidic to slightly acidic, with low basis saturation, high Al saturation and low effective and potential CEC. Seventy percent of the pedons were classified as Umbrisols. However, the weathering intensity was higher in the Portachuelo Valley, as indicated by the presence of crystalline iron oxides and the transformation of primary minerals (chlorite) to secondary (HIS-Smectite). The results demonstrate that the weathering intensity is controlled by microclimate, parent material and regional climate. In the second part, the thermal and hydric behavior of the soils below the snow line is evaluated in different kind of vegetation, Roquedal (4 835 m.a.s.l.), Pajonal (4 705 m.a.s.l.) and Polylepis forest (4 448 m.a.s.l.). In order to do this, sensors were installed and data recorded every hour between June 2011 and June 2012. The daily regimes of soil temperature of freeze-thaw days (FTD) and thaw-days (TD) were observed. Precipitation seasonality and microclimate controls the frequency of these regimens. The higher frequency of FTD is related with the dry season. On the other hand, TD rises in the wet season. The FTD regimen is dominant in all months in Roquedal soils and in the dry season in Pajonal and Polylepis forest soils. The frequency of TD is higher in the Polylepis forest soils. Patterns detected in the daily amplitude are influenced by insolation, cloudy cover and water content. In the periods with high thermal amplitude it was verified that soil moisture is lower. Conversely, the thermal amplitude was found to decrease with increasing soil moisture. However, long-term data is necessary for a fuller understanding of temperature and moisture behavior in soils of this region. The third part deals with the

identification of plants based on phytoliths in soils with different moisture regimes, and the creation and examination of a modern phytolith assemblage to be used as reference collection in paleoenvironmental studies. Vascular species were sampled in the same sites where the soil temperature/moisture sensors were installed. Thirteen plant types were identified, among them nine of the Poaceae family. The Poaceae, which occurs in the three kinds of vegetation, belongs to the sub-family Festucoid (Pooideae – with C₃ photosynthetic system) and produces circular, rectangular, oblong and rondels phytolith types. The *Agrostis* genus have distinguishable Festucoides phytoliths, being larger and thinner. Taking account the results, we concluded that the use of phytolith to differentiate the three type of vegetation is limited, since the phytolith assemblage did not show differences even occurring in soils with different moisture regimes. Therefore, care should be taken when using phytolith assemblages to reconstruct paleoenvironmental conditions in this area.

INTRODUÇÃO GERAL

Esta tese é parte das pesquisas realizadas pelo grupo TERRANTAR da Universidade Federal de Viçosa, coordenado pelo professor Carlos Ernesto G. R. Schaefer, que monitora solos afetados por permafrost e mudanças climáticas na Antártica desde 2002.

O estudo de solos na Cordilheira Blanca nos Andes peruanos é um desdobramento deste grande projeto que ampliou seus estudos para áreas de alta montanha na Cordilheira dos Andes, com o objetivo de estabelecer uma rede de monitoramento de mudanças ambientais e climáticas num grande transecto climático-latitudinal. Este transecto abrange regiões em áreas livres de gelo da Antártica e regiões dos Andes da Argentina, Chile, Peru e Equador.

A Cordilheira Blanca localizada na porção norte do Peru é a maior cadeia de montanhas tropicais com glaciais no mundo. Possui mais de 30 picos acima de 6.000 m de altitude e a linha de neve inicia-se aproximadamente a 5.000 m (INRENA, 2003).

Os glaciares da Cordilheira Blanca são de extrema importância para a população residente na árida bacia do Rio Santa, o segundo maior rio do Peru. As águas de degelo dos glaciares durante o ano inteiro alimentam pequenos cursos de água que são tributários do Rio Santa (Mark, 2008; Vuille et al., 2008).

Entretanto, estudos glaciológicos revelaram que os glaciares da Cordilheira Blanca estão se retraindo desde o século passado (Kaser et al., 1996; Raup et al., 2006). Assim como os glaciares, a temperatura do solo abaixo da linha de neve é sensível à mudanças climáticas e pode refletir tendências de longo prazo (Gilichinsky et al., 1998, Kaser et al., 1990; Mark, 2008).

Além disto, possui uma paisagem jovem de alta instabilidade, alta variação altitudinal associados com a ocorrência de diferentes fitofisionomias e um gradiente climático entre as faces leste/úmida e leste/seca que podem afetar os processos de formação de solos e a intensidade de intemperismo.

Deste modo, a tese objetiva entender a relação solo e paisagem na Cordilheira Blanca e para isto, ela foi dividida em três capítulos. No capítulo 1 o objetivo foi avaliar os processos pedogenéticos e a intensidade do intemperismo em solos ao longo do gradiente climático (leste/oeste) na região norte da Cordilheira Blanca, Peru a partir de propriedades físicas, químicas e mineralógicas.

No capítulo 2 o objetivo foi monitorar a temperatura e umidade do solo em profundidade em três fitofisionomias da fachada leste da Cordilheira Blanca (Portachuelo) para compreender comportamentos influenciados por fatores macroclimáticos e microclimáticos. Para isto, foram utilizados dados de 1 ano hidrológico de monitoramento, entre junho de 2011 a junho de 2012.

No capítulo 3 o objetivo foi identificar espécies de plantas produtoras de fitólitos sobre solos com diferentes regimes de umidade da Cordilheira Blanca e estabelecer e examinar assembleias modernas de fitólitos para que possam ser usadas como referência em estudos paleoambientais.

CAPÍTULO 1

PEDOGÊNESE EM UM GRADIENTE CLIMÁTICO DE ALTA MONTANHA TROPICAL, CORDILHEIRA BLANCA – ANDES PERUANOS

Resumo

O objetivo deste capítulo foi avaliar processos pedogenéticos e a intensidade do intemperismo nos solos ao longo do gradiente climático (leste/oeste) na região norte da Cordilheira Blanca no Peru a partir de propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Foram amostrados pedons em duas catenas, 6 em Llanganuco (leste-seco) e 4 em Portachuelo (oeste-úmido). Os pedons de ambas as catenas são formados por depósitos coluviais e são esqueléticos. São fracamente desenvolvidos, apresentando os horizontes O, A, C e C/R. Os pedons das duas catenas também compartilham os mesmos processos de formação de solos, associados com a acumulação de matéria orgânica como humificação, melanização e formação de complexos organometálicos. Os horizontes superficiais tem alta concentração de COT e são muito escuros. Os maiores valores de COT foram encontrados nos pedons sob bosque de *Polylepis*. De modo geral, os pedons são ácidos a ligeiramente ácidos, baixa saturação por bases, alta saturação por Al e CTC efetiva e potencial baixa. 7 pedons foram classificados como Umbrisols, 1 como Fluvisol, 1 como Leptosol e 1 Regosol. No entanto, foi verificada diferença na intensidade de intemperismo entre os pedons das duas catenas. Alguns pedons de Portachuelo mostraram formação de óxidos de ferro cristalino e transformação de minerais primários (clorita) para secundários (EHE-Esmectita), demonstrando que o microclima, o material de origem e o clima regional controlaram a intensidade do intemperismo.

Palavras chave: Cordilheira dos Andes; Parque Nacional Huascarán; Processos pedogenéticos; Mineralogia.

1. Introdução

As altas montanhas tropicais possuem alta diversidade de ambientes que influenciam no desenvolvimento dos solos, como precipitação orográfica, intensa radiação solar, temperaturas estáveis ao longo do ano combinadas com forte variação diária e características topográficas, como declividade e faces de exposição solar (Monasterio, 1971; Monasterio, 1980; Monasterio e Vuilleumier, 1986; Sarmiento, 1986).

De forma geral, os solos das altas montanhas tropicais na Cordilheira dos Andes são pouco desenvolvidos e compartilham processos de formação de solos vinculados à alta acumulação de matéria orgânica, conferindo coloração escura aos horizontes superficiais, elevada acidez e baixa saturação por bases (Alexander e Pichott, 1979; Drosdoff et al. 1960; Storie, 1953). De acordo com Beek e Bramaio (1968) o fraco desenvolvimento dos solos está associado a intensa erosão e sedimentação devido à instabilidade da paisagem.

Em contrapartida, a ocorrência de solos com maior grau de desenvolvimento foi reportada por Miller e Birkeland (1992); Miller et al. (1993); Wilcox et al. (1988); Eash e Sandor (1995); Rodbell (1993) em ambientes de maior estabilidade nos Andes peruanos. Miller e Birkeland (1992); Miller et al. (1993) encontraram na Cordilheira Oriental (7-8°S) no norte do Peru solos com horizontes Bw e Bt em encostas estáveis desde o final do Pleistoceno e início do Holoceno.

No entanto, não existem estudos publicados de gênese de solos e avaliação da intensidade de intemperismo em ambientes de alta instabilidade nos Andes peruanos. A Cordilheira Blanca, situada na porção norte do Peru é uma área interessante para estudos desta natureza. Ela tem uma paisagem jovem de alta instabilidade, alta variação altitudinal associados com a ocorrência de diferentes fitofisionomias e um gradiente climático entre as faces leste/úmida e leste/seca que podem afetar os processos de formação de solos e a intensidade de intemperismo.

Deste modo, esta pesquisa objetiva avaliar processos pedogenéticos e a intensidade do intemperismo em solos ao longo do gradiente climático (leste/oeste) na região norte da Cordilheira Blanca, Peru a partir de propriedades físicas, químicas e mineralógicas.

2. Área de estudo

A Cordilheira Blanca ou Yurak Janka (na língua Quechua) localiza-se no norte do Peru, no estado de Ancash (Figura 1). Com extensão latitudinal entre 8 a 11° S e longitudinal entre 77 a 78° W, a Cordilheira Blanca é a maior cadeia de montanhas tropicais com glaciais no mundo. São mais de 30 picos acima de 6.000 metros de altitude e o glaciar Huascarán Sul é o maior, com 6.768 metros de altitude. Toda a extensão da Cordilheira Blanca é protegida desde de 1975 pelo Parque Nacional Huascarán (INRENA, 2003).

A estação úmida ocorre entre outubro a abril e a estação seca entre maio a setembro. O volume de precipitação é significativamente variável entre as faces leste e oeste, onde ambas são afetadas pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A ZCIT alcança a Cordilheira Blanca através da face leste, levando massas de ar úmidas e quentes provenientes da bacia Amazônica. A face leste é mais afetada por massas de ar frias e secas devido a anticiclone no Oceano Pacífico formado pela influência da Corrente de Humboldt. Parte da umidade das massas de ar quentes e úmidas da face leste conseguem atravessar a montanha, levando umidade para a face oeste, principalmente nas porções mais elevadas (Kaser et al., 1990).

A média de precipitação anual nas altas altitudes pode chegar a 1.100 mm e 600 mm nas baixas altitudes (INRENA, 2003). A média anual da temperatura é fortemente relacionada com a altitude (Silverio, 2003): 2.400 – 3.500 m = 13 °C; 3.500 – 4.000 m = 8 °C e 4.000 – 4.800 = 3 °C. A linha de neve ocorre aproximadamente a 5.000 m.

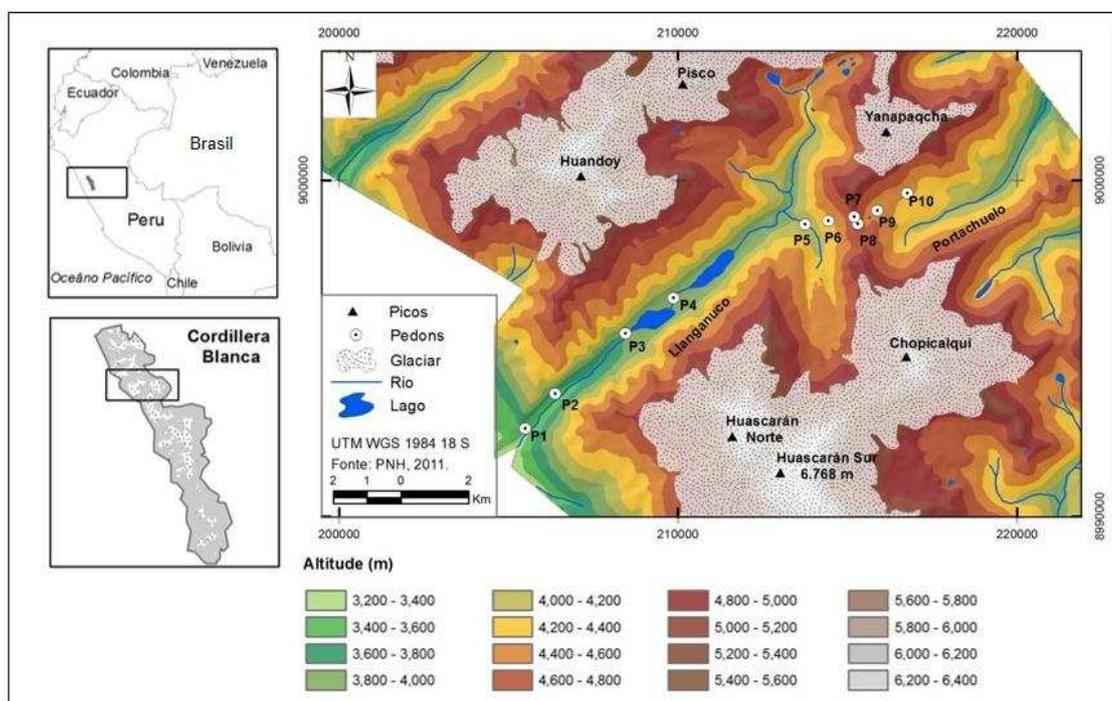


Figura 1. Localização da área de estudo – Vale Llanganuco e vale Portachuelo.

A litologia da Cordilheira Blanca é composta principalmente por um batólito de granodiorito leucocrático do Plioceno/Mioceno, composto por 70 a 73% de SiO₂, que é cortado por diques de basaltos (Petford et al., 1996).

A porção norte da Cordilheira Blanca contém a maior parte dos glaciares com picos acima de 6.000 m. O relevo possui pronunciadas formas glaciais e periglaciais: Vales em forma de U são preenchidos por depósitos glaciais e fluvioglaciais e por depósitos aluviais, coluviais e periglaciais do final do Pleistoceno/Holoceno (Farber et al., 2005; Rodbell, 1992).

A Cordilheira Blanca pertence ao ecossistema Puna (INRENA, 1990). Ela possui as principais fitofisionomias da Puna Peruana. O Matorral é composto por vegetação arbustiva e ocorre em encostas e vales entre 2.400 a 3.800 m. Pajonal é dominado por espécies da família Poaceae como Calamagrostis e Javara e é encontrado entre 3.800 a 4.800 m. O Roquedal ocorre entre 4.800 a 5.000 m, possui solos crioturbados e é composto predominantemente por Asteraceae, Poaceae e Brassicaceae (Cano et al., 2005; Cano et al., 2010). O Bosque de Polylepis (ou Queñuales) é dominado por espécies arbóreas da família

Rosaceae. Esta floresta pode ser densa ou esparsa, com dossel variando entre 6 a 12 metros (Cuesta et al., 2009).

3. Métodos

3.1. Seleção das áreas para amostragem e coleta de solos.

Foi feito um levantamento preliminar na Cordilheira Blanca para definir os locais de amostragem. A porção norte foi selecionada como área de estudo devido à alta diversidade de ambientes e facilidade de acesso, permitindo coletar solos na face oeste (Vale Llanganuco – seco) e cruzar a montanha para coletar na face leste (Vale Portachuelo – úmido).

Ambos os vales foram visitados para identificar áreas representativas para amostragem, considerando a topografia e a diversidade da vegetação. Foram estabelecidas duas catenas de acordo com o conceito de Milne (1935). Na catena em Llanganuco foram coletados 6 pedons e 4 na catena em Portachuelo, cobrindo um intervalo entre 3.482 a 4.835 m (Figura 1). As áreas amostradas foram todas dentro dos limites do Parque Natural Huascarán devido a menor influência antropogênica. A descrição de todos os pedons foi feita de acordo com Guidelines for soil description FAO (2006). A cor dos solos foi determinada de acordo com Munsell soil color chart – MSCC (2000).

3.2. Análises dos solos

As amostras de solos foram destorroadas em almofariz de ágata e peneiradas para o tamanho < 2 mm para obter de terra fina seca ao ar (TFSA). A distribuição granulométrica foi determinada pelo método da pipeta adaptado por Ruiz (2005). Para identificar discontinuidades litológicas foi usada a relação silte/areia e também a distribuição da pedregosidade (> 2 mm) (Schaetzl, 1998).

O pH foi determinado por condutividade elétrica com 1:2,5 solo/solução. Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} trocáveis foram extraídos com 1M KCl e P, Na e K com o extrator Mehlich-1 (EMBRAPA, 1997). A determinação do Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foi feita por espectrometria de absorção atômica, K e Na por emissão de chamas e P por fotolorimetria. A determinação de retenção de P foi feita de acordo com Alvarez et al. (2000). O carbono orgânico total foi determinado pelo PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O.

Para verificar a quantidade de Fe e Al (Fe_p e Al_p) complexados a matéria orgânica foi utilizado o método de McKeague (1967), onde usou-se 0.1 M de pirofosfato de sódio a pH 10.0. Para extrair Fe, Al e Si de hidróxidos pobremente cristalizados (Fe_o , Al_o , Si_o) foi usada solução 0.2 M oxalato de amônio a pH 3.0 seguindo Schwertmann (1964). Para estimativa de minerais aluminossilicatos de baixa cristalinidade foi utilizada a fórmula $Al_o - Al_p / Si_o$ proposta por Parfitt e Kimble (1989). Para identificar alofana, a razão molar Al/Si deve variar entre 1 e 2 (Parfitt et al., 1980).

Para extração de Fe e Al pedogenéticos (Fe_d e Al_d) foi usado o método ditionito-citrato-bicarbonato por Mehra e Jackson (1960). Os elementos extraídos de todas as análises foram determinados por espectrometria de absorção atômica. A proporção de ferridrita foi determinada usando a relação Fe_o/Fe_d (Schwertmann, 1985). Para determinar propriedades ândicas usou-se $Al_o + 1/2 Fe_o$ de acordo com IUSS-Working Group WRB (2006).

Outro método usado para avaliar o desenvolvimento do solo foi a relação ($Fe_d - Fe_o$)/ Fe_t que quantifica a proporção de óxidos de ferro bem cristalinos em relação ao conteúdo total de ferro no solo (Arduino et al., 1984). Para obter a quantidade total de ferro usou-se o método da fusão alcalina (fração do solo < 2 mm) de todos os horizontes dos pedons (Sawhney e Stilwell, 1994). Os extratos foram mensurados em ICP OES.

Foram selecionados os fragmentos de rocha mais representativos de cada pedon para identificar o material de origem. A composição química das rochas foi mensurada por XRD e posteriormente identificadas a partir da composição elementar pelo método de Nockolds (1954).

A argila usada nas análises de difratometria de raio-x foi extraída da TFSA por técnicas de sedimentação (EMBRAPA, 1997). Para identificação dos minerais foram montadas lâminas não orientadas de argila natural e lâminas com pré-tratamentos. Foram feitos tratamentos com saturação por K, saturação por Mg, solvatação por Mg glicerol, saturação por K e aquecimento a 350°C e a 550°C. Todas as lâminas foram levadas ao DRX com radiação de Co α desde 5° a 50° 2 θ .

Os solos foram classificados de acordo com World Reference Base for Soil Resources (FAO, 2006).

4. Resultados

4.1. Morfologia e características físicas

Os pedons de Llanganuco e Portachuelo são formados por depósitos sedimentares como fluviais e principalmente por talus (Tabela 1). A origem dos depósitos da Cordilheira Blanca está associada a movimentos de massa, que são característicos em vales de alta montanha tropical com presença de geleiras e por esporádicos terremotos (Klimeš et al., 2009; Silgado, 1978).

Tabela 1. Características das áreas investigadas em Llanganuco e Portachuelo.

Pedon	Localização X/Y-UTM 18S	U G ¹	Posição na encosta ²	Elevação m	Aspecto °N	D ³ %	Vegetação ⁴
Llanganuco							
P1	205498/8992600	Talus	Foot slope	3.482	144 - Sudeste	15	Matorral
P2	206383/8993646	Talus	Back slope	3.580	145 - Sudeste	80	Matorral
P3	208464/8995449	Talus	Foot slope	3.830	169 - Sul	20	Bosque de Polylepis
P4	209866/8996499	Leito maior	Toe slope	3.836	200 - Sul	2	Matorral
P5	213763/8998698	Talus	Foot slope	4.026	257 - Oeste	15	Bosque de Polylepis
P6	214455/8998801	Talus	Back slope	4.363	146 - Sudeste	40	Matorral
Portachuelo							
P7	215217/8998923	Talus	Summit	4.835	145 - Sudeste	5	Roquedal
P8	215315/8998709	Talus	Shoulder	4.705	106 - Leste	60	Pajonal de Puna
P9	215895/8999109	Talus	Back slope	4.493	48 - Nordeste	15	Pajonal com Lupinus sp.
P10	216777/8999676	Talus	Back slope	4.448	160 - Sul	25	Bosque de Polylepis

¹ Unidades geomorfológicas; ² Posição na encosta de acordo com FAO, 2006a; Ruhe, 1960. ³ Declividade; ⁴ Tipo vegetacional de acordo com Cano et al., 2005; Cano et al., 2010.

A presença de descontinuidades litológicas em todos os pedons, sem desenvolvimento de horizonte B, demonstram que a dinâmica de erosão/sedimentação coluvial é intensa devido a instabilidade das encostas. No geral, os pedons de origem coluvial em Llanganuco exibiram entre 2 e 4 descontinuidades e em Portachuelo entre 1 e 3. Nos períodos com relativa estabilidade da paisagem permitiram a formação dos solos, envolvendo principalmente processos relacionados à acumulação de matéria orgânica, com formação de horizontes O, A, além de C e C/R (Tabela 2, figuras 2, 3, 4 e 5).

A profundidade dos pedons variou entre os dois vales e principalmente de acordo com sua posição na encosta. Os pedons mais profundos estão localizados nas porções mais baixas de Llanganuco, entre 3.482 e 4.026 m. Por exemplo, entre P1 e P5 (Tabela 2). Por outro lado, o P6 localizado a 4.363 m é mais raso.

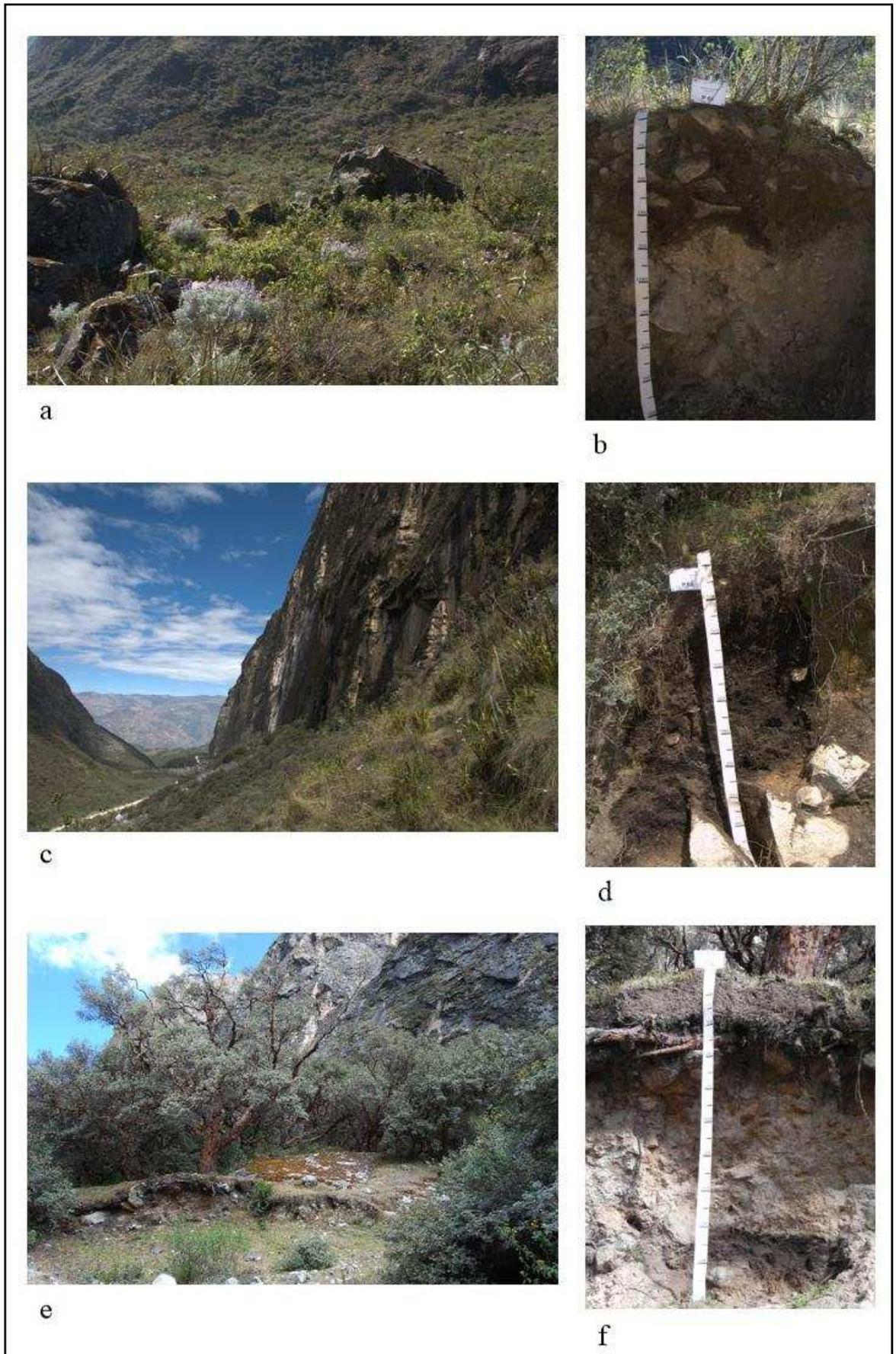


Figura 2. Fitofisionomias e perfis de solo amostrados em Llanganuco. a) e b) Vista geral do Matorral e P1. c) e d) Vista geral do Matorral e b) P2. e) Vista geral do Bosque de Polylepis e f) P3.

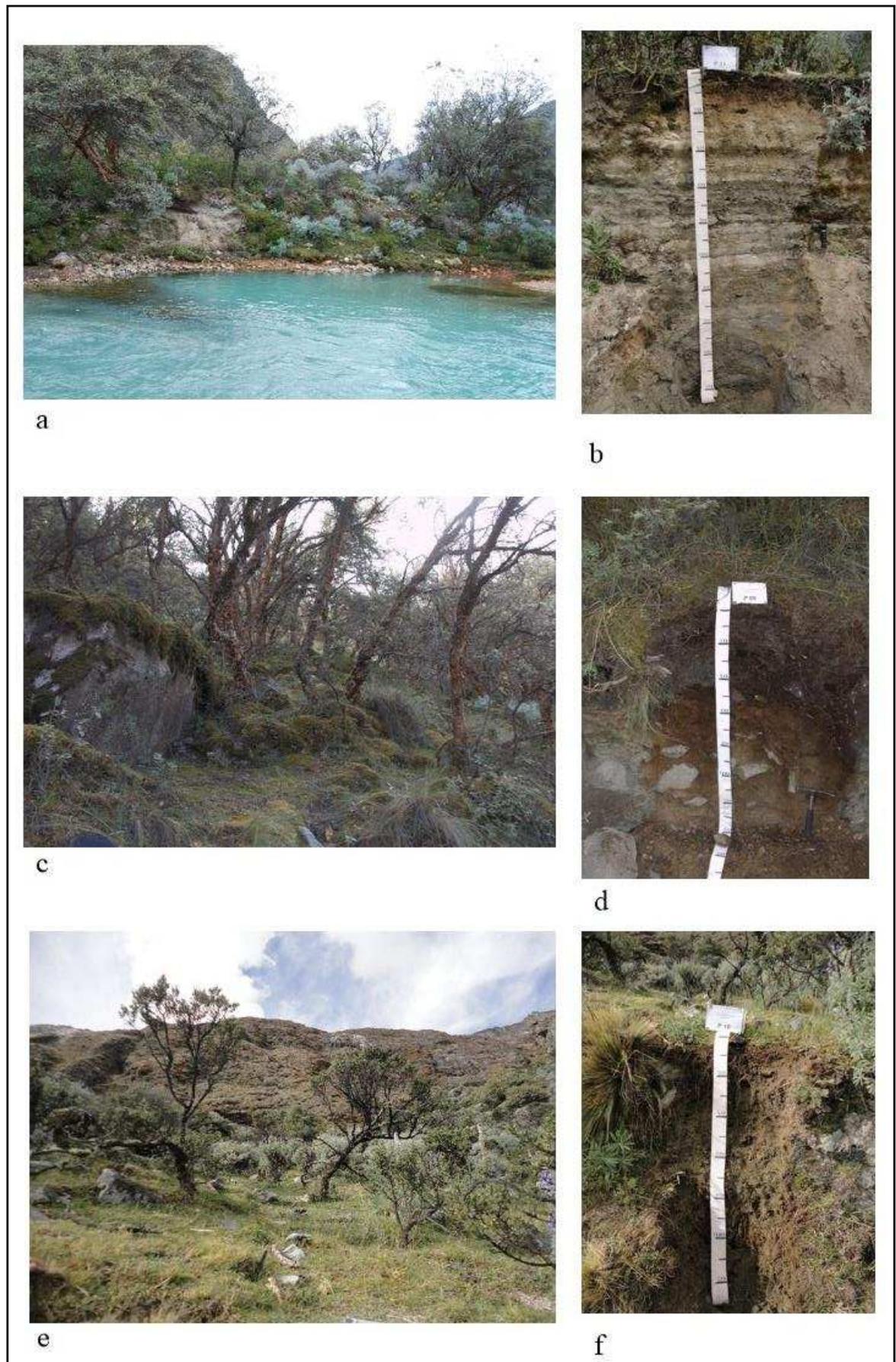


Figura 3. Fitofisionomias e perfis de solo amostrados em Llanganuco. a) e b) Vista geral do Matorral e P4. c) e d) Vista geral do Bosque de Polylepis e b) P5. e) Vista geral do Matorral e f) P6.

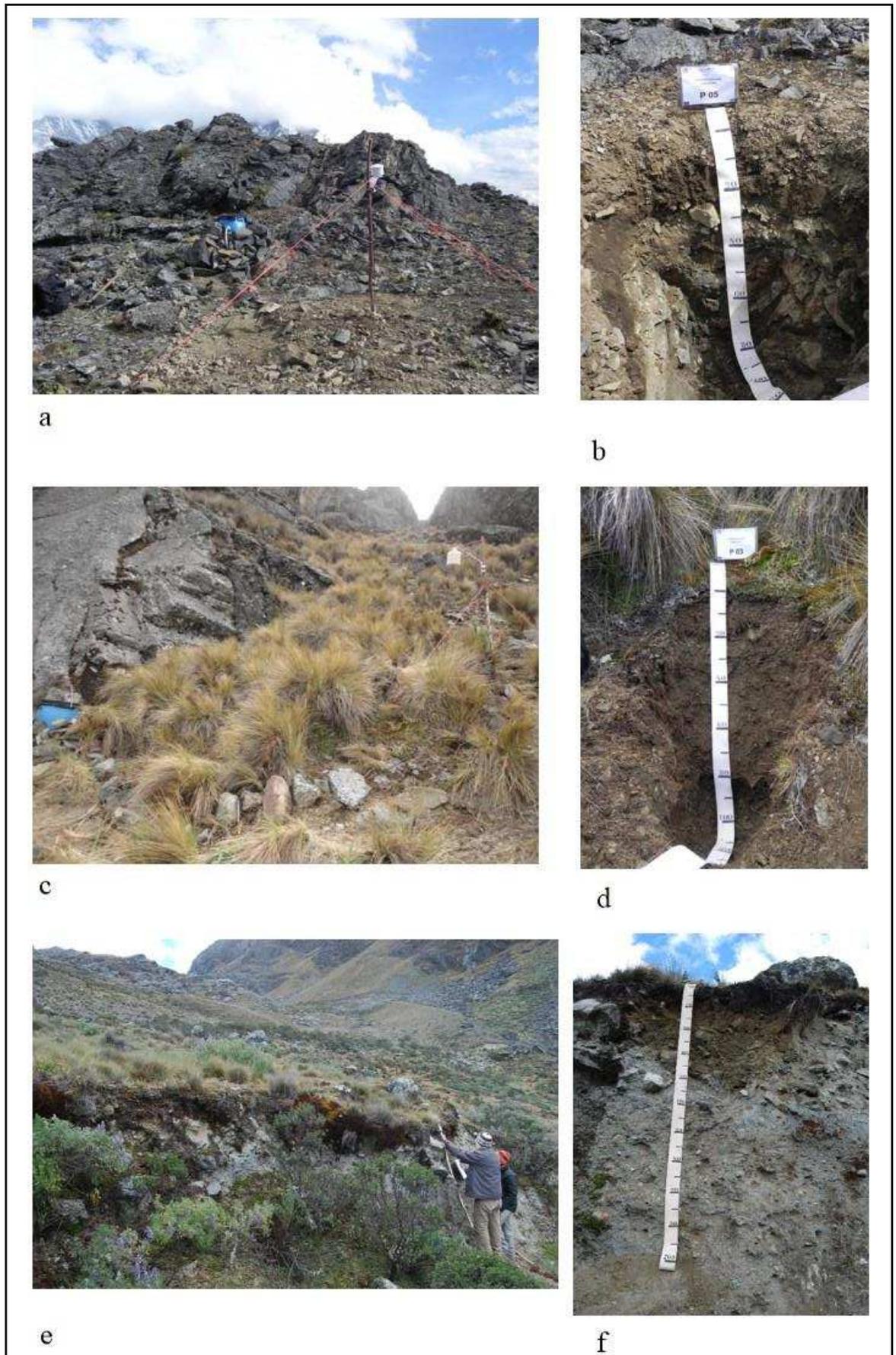


Figura 4. Fitofisionomias e perfis de solo amostrados em Portachuelo. a) e b) Vista geral do Roquedal e P7. c) e d) Vista geral do Pajonal de Puna e b) P8. e) Vista geral do Pajonal com *Lupinus SP*. e f) P9.

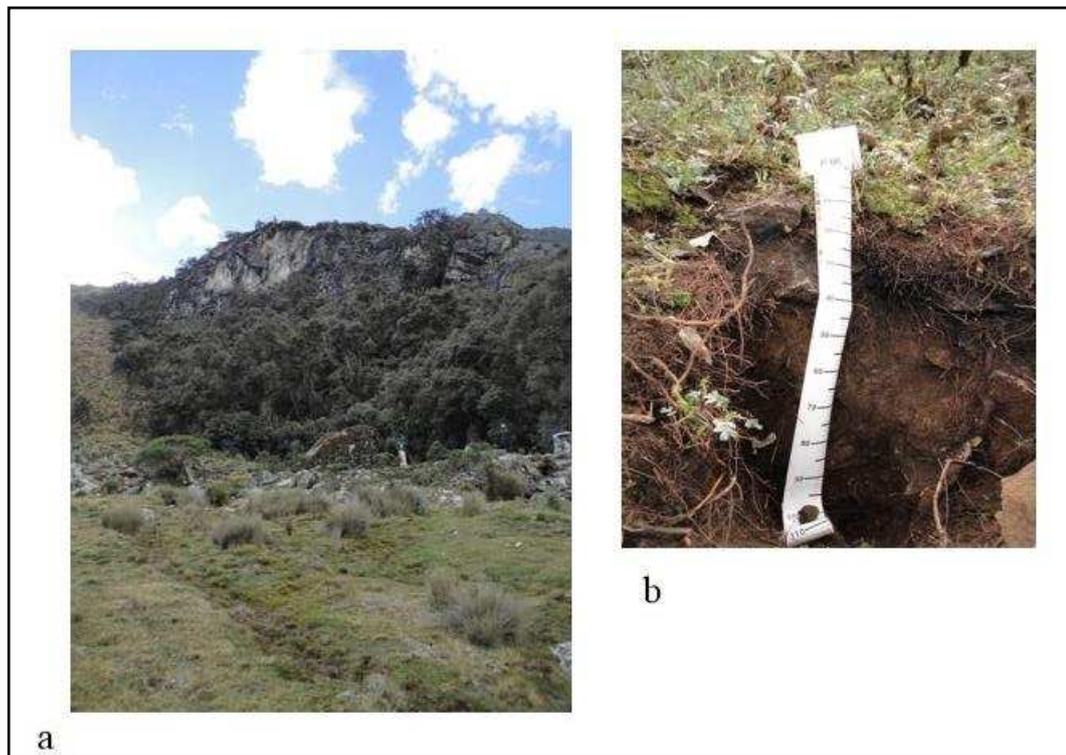


Figura 5. Fitofisionomia e perfil de solo amostrado em Portachuelo. a) Vista geral do Bosque de Polylepis e b) P10.

Os pedons de Portachuelo são geralmente mais rasos em relação os pedons de Llanganuco devido à localização em cotas mais elevadas e conseqüentemente o pacote sedimentar é menor. Porém, apresentaram a mesma tendência de diminuição de profundidade de acordo com a altitude. O P7 localizado no topo do morro a 4.835 m é o mais raso, com apenas 40 cm. Mesmo localizando-se no topo do morro, este pedon possui seqüência de horizontes enterrados por receber colúvio de uma crista rochosa em sua lateral.

A maioria dos solos tem horizontes A muito escuros (matiz e croma ≤ 3) (Tabela 2). Os horizontes com pequena acumulação de matéria orgânica são geralmente acinzentados. Os horizontes A de todos os pedons tem estrutura granular, de moderadamente para fraca e não são plásticos e nem pegajosos. Os pedons são esqueléticos e refletem a natureza do material sedimentar, com exceção do P4 que é um solo fluvial. Geralmente os pedons tem textura loamy sand, sandy loam ou loam (Tabela 2). Os maiores teores de argila foram observados no P5 (foot slope) e P10 (back slope) sob Bosque de polylepis. Em contraste, P8 localizado no shoulder possui maior quantidade de areia.

Tabela 2. Dados morfológicos e físicos dos pedons de Llanganuco e Portachuelo.

Pedon	Horiz.	Prof. cm	Cor úmida	AG,	AF ²	Silte ³	Ar ⁴	Silte/ Areia	Classes Texturais ⁵
				AM ¹	g/kg				
Llanganuco									
P1 - Haplic Umbrisol (Humic, Hyperdystric, Skeletic)									
	Ah	0-10	2.5Y3/2	200	230	470	100	1,09	L
	2Ahb1	10-40	2.5Y2.5/1	320	260	290	130	0,50	SL
	2Ahb2	40-70/80	10YR2/1	310	230	270	190	0,50	SCL
		70/80-							
	3C1	90/95	5Y3/2	570	220	160	50	0,22	LS
		90/95-							
	4C2	200+	5Y5/2	600	220	160	20	0,20	LS
P2 - Haplic Umbrisol (Alumic, Humic, Hyperdystric, Skeletic)									
	Ah	0-30/40	5Y2.5/1	460	200	230	110	0,34	SL
		30/40-							
	2Ahb	120/140	5Y2.5/1	440	230	220	110	0,33	SL
		120/140-							
	3C	150-170	10YR4/2	500	170	260	70	0,39	LS
P3 - Haplic Umbrisol (Alumic, Humic, Hyperdystric, Skeletic)									
	Ah	0-10	2.5Y2.5/1	510	200	190	100	0,27	LS
	2Ahb1	10-35	2.5Y3/2	610	200	120	70	0,15	LS
	3Ahb2	35-45	2.5Y2.5/1	620	170	130	80	0,16	LS
	4Ahb3	45-70	2.5Y3/2	640	200	130	30	0,15	LS
	4C	70-160	2.5Y3/3	670	160	150	20	0,18	LS
	5Ahb	160-180	2.5Y2.5/1	620	170	150	60	0,19	LS
	5C	180-200	2.5Y3/3	720	150	110	20	0,13	S
P4 - Endogleyic Endostagnic Fluvisol (Humic, Orthodystric)									
	Ah1	0-3	2.5Y2.5/1	120	360	340	180	0,71	L
	2Ah2	3-7	2.5Y3/2	150	400	310	140	0,56	SL
	2Ah3	7-15	2.5Y3/3	210	420	300	70	0,48	SL
	3C1	15-30	2.5Y4/2	330	460	180	30	0,23	LS
	4C2	30-40	5Y3/2	150	390	410	50	0,76	SL
	4C3	40-55	5Y4/2	240	240	400	120	0,83	L
	5C4	55-60	5Y4/1	130	140	600	130	2,22	SiL
	6Cg1	60-75	5Y5/1	430	420	130	20	0,15	LS
	6Cg2	75-110	5Y5/1	450	390	150	10	0,18	LS
	7Cg3	110-180+	5Y5/1	50	220	620	110	2,30	SiL
P5 - Haplic Umbrisol (Hyperhumic, Hyperdystric, Skeletic)									
	Ah	0-30	10YR2/1	280	150	300	270	0,70	L
	2Ahb1	30-50/70	2.5Y2.5/1	410	120	250	220	0,47	SCL
		50/70-							
	3Ahb2	90/100	10YR2/2	620	200	140	40	0,17	LS
		90/100-							
	4C	120+	2.5Y4/2	530	220	220	30	0,29	LS
P6 - Haplic Regosol (Hyperhumic, Eutric, Skeletic)									
	Oi	0-3	2.5Y2.5/1	50	110	500	340	3,13	SiCL
	2Ahb1	3-15	2.5Y2.5/1	230	150	420	200	1,11	L
	3Ahb2	15-72	2.5Y4/2	450	270	200	80	0,28	LS
Portachuelo									
P7 - Haplic Leptosol (Humic, Dystric, Skeletic)									
	Ah	0-3	2.5Y3/1	480	100	290	130	0,50	SL
	2Ahb1	3-10/20	2.5Y3/1	250	110	480	160	1,33	L
	3Ahb2	10/20-25	5Y2.5/2	420	90	340	150	0,66	L
	4Ahb3	25-40	2.5Y3/1	470	90	290	150	0,52	SL
P8 - Haplic Umbrisol (Hyperdystric, Humic, Skeletic)									
	Ah	0-5	2.5Y3/2	650	100	200	50	0,27	LS
	A/C	5-15	2.5Y3/2	660	120	170	50	0,22	LS
	2Ahb1	15-60	2.5Y3/2	670	80	200	50	0,27	LS
	2Ahb2	60-80	2.5Y3/3	600	120	190	90	0,26	LS

Continua

Continuação									
P9 - Haplic Umbrisol (Endodystric, Humic, Skeletic)									
Ah	0-10	5Y2.5/1	250	210	370	170	0,80	L	
2Ahb1	10-20	2.5Y2.5/1	380	250	230	140	0,37	SL	
2Ahb2	20-55	5Y3/2	470	220	200	110	0,29	SL	
2Ahb3	55-80	5Y4/1	550	170	170	110	0,23	SL	
3C/R	80-195	5Y4/2	370	190	280	160	0,50	SL	
P10 - Folic Umbrisol (Hyperhumic, Orthodistric, Skeletic)									
Oi	0-10	10YR2/1	270	40	380	310	1,23	CL	
2Ahb1	10-20	10YR2/1	330	110	340	220	0,78	L	
3Ahb2	20-40	10YR2/1	370	140	300	190	0,59	L	
3Ahb3	40-70	2.5Y2.5/1	410	150	270	170	0,48	SL	
3Ahb4	70-90+	2.5Y2.5/1	400	140	290	170	0,54	SL	

¹ Areia grossa + areia fina 2.000 - 200 μm ² Areia fina 200 - 50 μm ³ 50 - 2 μm ⁴ Argila < 2 μm . ⁵ Classes texturais de acordo com FAO (2006). S = Sand; LS = Loamy sand; SL = Sandy loam; SCL = Sandy clay loam; SiL = Silt loam; SiCL = Silty clay loam; CL = Clay loam; L = Loam.

4.2. Características químicas

A maioria dos pedons em Llanganuco tem pH variando entre 4,47 a 6,30. Possuem baixa saturação de bases, alta saturação por Al^{3+} e baixa CTC efetiva e potencial (Tabela 3). Somente o P6 tem pH próximo a neutralidade, variando entre 6,54 a 6,74. Em adição, tem altos valores de Ca^{2+} trocável nos horizontes Oi e 2Ahb1, 13,4 cmol/dm^3 10,2 cmol/dm^3 respectivamente, e tem alta soma de bases e de CTC efetiva e potencial. Por isto, a saturação de bases é alta e a saturação de Al^{3+} é nula. Os pedons em Portachuelo tem pH variando entre 4,10 a 6,02, baixa saturação de bases, alta saturação por Al^{3+} e baixa CTC efetiva e potencial.

Todos os pedons tem elevados valores de carbono orgânico total (COT), especialmente nos horizontes superficiais (Tabela 3). Em Llanganuco o maior conteúdo de COT foram encontrados nos pedons sob Bosque de Polylepsis. Por exemplo, P3 e P5 com 91,4 g/kg e 175,0 g/kg, respectivamente. Os pedons sob Matorral, por exemplo P1 e P2 tem as menores quantidades de COT, com 37,7 g/kg e 53,4 g/kg, respectivamente. Por outro lado, o P6 também sob Matorral tem horizonte orgânico Oi com 307,0 g/kg (0-3 cm profundidade) e o horizonte subsequente 2Ahb1 com 72,5 g/kg. O P4 tem 127,0 g/kg (0-3 cm profundidade) no seu horizonte superficial.

A mesma tendência de alta concentração de COT sob bosque de Polylepsis também foi observada em Portachuelo. O P10 tem 411,0 g/kg no horizonte Oi e 183,0 g/kg no horizonte 2Ahb1. Os pedons sob Pajonal de Puna (P8) e Roquedal (P7), tem os menores conteúdos de COT da catena. No geral, os pedons de Portachuelo tem maiores concentrações de COT em comparação aos pedons de Llanganuco. A concentração de COT diminui em profundidade na maioria dos pedons, exceto P1, P3, P7 e P10 devido a presença de horizontes enterrados com elevada concentração de COT, portanto não seguem uma tendência geral.

Tabela 3. Dados químicos da TFSA dos pedons de Llanganuco e Portachuelo.

Pedon	pH	pH	P	K	Na	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al ⁽¹⁾	SB ⁽²⁾	CTC _{ef} ⁽³⁾	CTC _{pot} ⁽⁴⁾	V ⁽⁵⁾	Al sat ⁽⁶⁾	P ret ⁽⁷⁾	COT ⁽⁸⁾
	H ₂ O	KCl	----- cmol/dm ³ -----							----- % -----			g/kg			
Llanganuco																
P1 - Haplic Umbrisol (Humic, Hyperdystric, Skeletic)																
Ah	5,65	4,49	0,38	0,11	0,02	2,89	0,30	0,30	6,60	3,32	3,62	9,92	33,5	8,30	52,7	37,7
2Ahb1	5,56	4,46	0,19	0,06	0,01	1,73	0,09	0,90	13,4	1,89	2,79	15,3	12,4	32,3	91,2	46,3
2Ahb2	5,57	4,49	0,10	0,03	0,02	2,18	0,03	0,90	14,5	2,26	3,16	16,8	13,5	28,5	94,3	48,5
3C1	5,79	4,77	0,37	0,02	0,01	0,41	0,02	0,40	4,90	0,46	0,86	5,36	8,60	46,5	80,5	10,2
4C2	5,83	4,95	0,55	0,04	0,02	0,18	0,03	0,00	1,80	0,27	0,27	2,07	13,0	0,00	46,7	13,5
P2 - Haplic Umbrisol (Alumic, Humic, Hyperdystric, Skeletic)																
Ah	5,70	4,49	0,14	0,22	0,01	4,55	0,48	0,40	14,5	5,25	5,65	19,8	26,6	7,10	80,5	53,4
2Ahb	5,52	4,24	0,06	0,08	0,03	1,26	0,18	1,90	16,5	1,55	3,45	18,1	8,60	55,1	89,5	42,1
3C	5,88	4,60	0,06	0,02	0,07	0,22	0,03	0,40	4,60	0,34	0,74	4,94	6,90	54,1	78,3	7,50
P3 - Haplic Umbrisol (Alumic, Humic, Hyperdystric, Skeletic)																
Ah	5,19	4,16	0,19	0,19	0,02	2,27	0,41	0,10	10,7	2,89	2,99	13,6	21,3	3,30	31,0	91,4
2Ahb	5,25	4,07	0,09	0,05	0,01	2,01	0,19	0,70	8,10	2,26	2,96	10,4	21,8	23,6	52,5	19,1
3Ahb	4,47	3,44	0,07	0,10	0,01	2,21	0,25	1,90	18,5	2,57	4,47	21,1	12,2	42,5	42,0	58,7
4Ahb	4,72	3,84	0,06	0,07	0,01	0,85	0,13	1,10	7,90	1,06	2,16	9,00	11,8	50,9	39,7	9,80
4C	5,72	4,54	0,08	0,06	0,02	0,66	0,10	0,40	4,00	0,84	1,24	4,84	17,4	32,3	43,3	4,60
5Ahb	5,53	4,37	0,08	0,07	0,01	1,27	0,27	0,90	11,1	1,62	2,52	12,7	12,7	35,7	80,2	3,64
5C	5,59	4,44	0,09	0,03	0,01	0,30	0,06	0,60	3,50	0,40	1,00	3,90	10,3	60,0	51,5	6,20
P4 - Endogleyic Endostagnic Fluvisol (Humic, Orthodystric)																
Ah1	6,00	5,23	1,20	0,51	0,03	9,30	1,30	0,00	6,30	11,1	11,1	17,4	63,9	0,00	35,3	127
2Ah2	5,38	4,30	0,64	0,45	0,02	2,76	0,35	0,50	10,4	3,58	4,08	14,0	25,6	12,3	59,0	49,1
2Ah3	5,56	4,49	1,39	0,33	0,04	0,71	0,08	0,40	5,60	1,16	1,56	6,76	17,2	25,6	63,3	17,5
3C1	5,92	4,75	3,11	0,29	0,02	0,51	0,06	0,40	3,30	0,88	1,28	4,18	21,1	31,3	45,5	7,40
4C2	5,69	4,66	2,52	0,29	0,02	0,48	0,05	0,10	2,50	0,84	0,94	3,34	25,1	10,6	46,5	10,9
4C3	5,36	4,52	1,62	0,51	0,03	0,52	0,06	0,20	4,10	1,12	1,32	5,22	21,5	15,2	60,2	7,70
5C4	5,49	4,50	0,51	0,27	0,06	0,71	0,06	0,30	2,80	1,10	1,40	3,90	28,2	21,4	46,5	13,3
6Cg1	6,27	5,04	0,45	0,19	0,03	0,39	0,04	0,00	1,20	0,65	0,65	1,85	35,1	0,00	35,0	5,80
6Cg2	6,30	5,09	0,64	0,16	0,02	0,39	0,03	0,00	1,00	0,60	0,60	1,60	37,5	0,00	36,8	1,56
7Cg3	6,28	4,94	0,63	0,38	0,03	0,84	0,08	0,00	1,70	1,33	1,33	2,93	45,4	0,00	50,0	8,90
P5 - Haplic Umbrisol (Hyperhumic, Hyperdystric, Skeletic)																
Ah	5,11	4,11	0,20	0,47	0,01	6,69	2,00	0,90	26,6	9,17	10,1	35,8	25,6	8,90	68,5	175
2Ahb1	4,98	3,89	0,11	0,48	0,05	3,54	1,12	2,70	35,3	5,19	7,89	40,5	12,8	34,2	88,2	135

Continua

Continuação

3Ahb2	5,45	4,53	0,32	0,13	0,01	0,63	0,13	0,60	9,70	0,90	1,50	10,6	8,50	40,0	88,2	18,6
4C	5,94	4,69	0,43	0,14	0,01	0,32	0,05	0,30	4,10	0,52	0,82	4,62	11,3	36,6	66,5	8,30
P6 - Haplic Regosol (Hyperhumic, Eutric, Skeletic)																
Oi	6,54	5,98	0,63	0,40	0,04	13,4	1,41	0,00	4,60	15,2	15,2	19,8	76,8	0,00	9,50	307
2Ahb1	6,74	5,97	1,52	0,37	0,06	10,2	0,88	0,00	3,00	11,5	11,5	14,5	79,3	0,00	44,5	72,5
3Ahb2	6,70	5,52	2,38	0,33	0,04	3,55	0,27	0,00	2,50	4,18	4,18	6,68	62,6	0,00	37,5	12,9
Portachuelo																
P7 - Haplic Leptosol (Humic, Dystric, Skeletic)																
Ah	5,43	4,47	1,73	0,14	0,00	0,32	0,09	0,70	5,80	0,55	1,25	6,35	8,70	56,0	70,3	34,9
2Ahb1	5,56	4,78	2,16	0,04	0,02	0,12	0,04	0,20	5,30	0,22	0,42	5,52	4,00	47,6	88,2	25,7
3Ahb2	5,48	4,82	0,63	0,01	0,00	0,10	0,28	0,30	6,40	0,39	0,69	6,79	5,70	43,5	88,2	30,8
4Ahb3	5,50	4,56	0,61	0,01	0,00	0,10	0,03	0,70	5,80	0,14	0,84	5,94	2,40	83,3	81,3	9,30
P8 - Haplic Umbrisol (Hyperdystric, Humic, Skeletic)																
Ah	5,57	4,33	1,25	0,50	0,03	1,45	0,22	0,40	5,30	2,20	2,60	7,50	29,3	15,4	52,8	17,0
A/C	5,50	4,35	0,61	0,13	0,03	1,15	0,18	0,50	4,60	1,49	1,99	6,09	24,5	25,1	53,3	13,0
2Ahb1	5,60	4,49	0,45	0,13	0,05	0,57	0,11	0,40	5,30	0,86	1,26	6,16	14,0	31,7	64,8	20,0
2Ahb2	nd	nd	0,99	0,10	0,04	0,44	0,07	0,40	3,30	0,65	1,05	3,95	16,5	38,1	56,0	14,8
P9 - Haplic Umbrisol (Endodystric, Humic, Skeletic)																
Ah	5,23	4,21	0,16	0,31	0,01	5,33	0,54	0,80	18,0	6,19	6,99	24,2	25,6	11,4	81,0	98,6
2Ahb1	5,50	4,37	0,13	0,18	0,01	2,58	0,24	0,90	10,4	3,01	3,91	13,4	22,4	23,0	82,7	31,7
2Ahb2	5,79	4,48	0,17	0,19	0,02	1,63	0,12	0,90	5,10	1,96	2,86	7,06	27,8	31,5	78,2	15,2
2Ahb3	5,99	4,61	0,16	0,11	0,04	1,26	0,10	0,40	4,00	1,51	1,91	5,51	27,4	20,9	70,0	15,5
3C/R	6,02	4,42	1,74	0,27	0,09	2,85	0,27	0,40	2,80	3,48	3,88	6,28	55,4	10,3	59,3	8,30
P10 - Follic Umbrisol (Hyperhumic, Orthodistic, Skeletic)																
Oi	4,28	3,35	0,48	0,53	0,02	6,95	0,86	0,90	22,4	8,35	9,25	30,8	27,2	9,70	11,2	411
2Ahb1	4,10	3,02	0,16	0,21	0,02	5,80	0,63	3,00	31,4	6,66	9,66	38,0	17,5	31,1	39,7	183
3Ahb2	4,99	3,73	0,17	0,09	0,03	7,02	1,96	4,30	19,3	9,10	13,4	28,4	32,0	32,1	75,5	41,2
3Ahb3	5,15	3,85	0,37	0,05	0,03	5,06	1,72	4,90	27,2	6,86	11,8	34,1	20,1	41,7	81,0	25,6
4Ahb4	5,60	4,22	0,48	0,06	0,04	5,32	2,02	1,00	12,4	7,44	8,44	19,8	37,5	11,8	74,5	34,9

¹Acidez potencial ²Soma de bases ³CTC efetiva ⁴ CTC potencial ⁵ Saturação de bases ⁶Retenção de fósforo ⁷Carbono orgânico total.

Os pedons das duas catenas não apresentaram diferenças na quantidade óxidos de ferro pedogenéticos (Tabela 4). A maioria dos pedons tem valores da relação Fe_p/Fe_o ligeiramente inferior a 1 e relação Al_p/Al_o entre 1 e 0,5. Valores acima de 1 para Fe_p/Fe_o e Al_p/Al_o foram observados em alguns pedons. Como resultado, os horizontes que possuem valores $Al_p/Al_o > 1$ mostrou valores negativos para a relação Al_o-Al_p/Si_o . Os valores da relação $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ são menores que 2%.

Os valores das relações Fe_o/Fe_d foram maiores que 0,5 e Al_o/Al_d próximas a 1. Valores acima de 1 de Al_o/Al_d foram observados em alguns pedons. Os valores de Fe_d-Fe_o/Fe_t para todos os pedons variou entre 0 a 0,17.

No entanto, o P7 no topo de morro em Portachuelo contrasta com os outros por ter apresentado os mais baixos valores de Fe_p/Fe_o (<0,31) na totalidade de seus horizontes. Além disto, o horizonte 2Ahb1 demonstrou valor de 0,20 da relação Fe_o/Fe_d e o mais alto valor encontrado da relação Fe_d-Fe_o/Fe_t (0,45).

4.3. Material de origem e análises de difração de raio-x

Os pedons em Llanganuco são formados a partir de granodiorito félsico, o P6 é uma exceção, ele localiza-se no topo da catena onde ocorre diferenciação de material no batólito, sendo formado por uma mistura de granodiorito félsico e diorito. Em Portachuelo a heterogeneidade do material de origem é maior. O P7 é formado por uma mistura de biotita tonalita e granodiorito félsico e P8, P9 e P10 por granodiorito, diorito e biotita tonalita (Tabela 5).

Em todos os pedons foram identificados minerais primários na fração argila (Tabela 5). Em Llanganuco os pedons P1 a P5 tem a mesma assembleia mineralógica, com quartzo, albita, feldspato potássico e illita-mica interestratificada. O P6 é mais heterogêneo, contém além destes minerais citados, anortita, anfibólio e clorita.

Os pedons em Portachuelo possuem quartzo, albita e feldspato potássico. Em adição a estes minerais, no P7 foi identificada clorita, P8 e P9 anortita e clorita. Não foi identificada clorita no P10 e sim um mineral interestratificado, esmectita com hidroxí entre camadas com esmectita (EHE-Esmectita), sendo o único pedon a apresentar este mineral.

A identificação da clorita foi confirmada pela não alteração nos picos 1,4 nm e 0,7 nm após os tratamentos e pelo pequeno aumento na intensidade dos picos. A identificação de EHE-Esmectita foi confirmada pela presença do pico em 1,46 nm na lâmina natural, um

pico a 1,65 nm após solvatação com Mg glicerol e colapso a 1,15 nm após saturação com K e aquecimento a 550°C.

4.4. Classificação dos solos

A maior parte dos pedons em ambas as catenas foram classificados como Umbrisols no primeiro nível categórico por conter o horizonte diagnóstico Umbric (Tabela 3), caracterizado por apresentar profundidade ≥ 20 cm, coloração escura (matiz e croma ≤ 3), horizonte superficial com depleção de bases (saturação de bases $\leq 50\%$) e ricos em matéria orgânica ($> 0,6\%$ TOC).

O P6 sob Matorral foi classificado como Haplic Regosol (Hyperhumic, Eutric, Skeletic) por não apresentar horizontes diagnósticos. Ele não possui horizonte Umbric porque é eutrófico e não tem horizonte Mollic devido sua fraca estrutura. Além disto, não se enquadraria como Leptosol porque não é extremamente pedregoso.

O P4 formado por depósitos aluviais foi classificado como Endogleyic Endostagnic Fluvisol (Humic, Orthodystric). Ele possui estratificação e tem sequência de horizontes C. Os mosqueados de ferro encontrados nos horizontes glei a partir de 60 cm de profundidade é um indicativo de flutuação do lençol freático. O P7 foi classificado como Haplic Leptosol (Humic, Dystric, Skeletic) por ser raso (40 cm), sobre rocha contínua e por ser extremamente esquelético (pedregoso).

5. Discussão

5.1. Processos pedogenéticos

Os processos de formação dos solos em Llanganuco e Portachuelo estão associados com a acumulação de matéria orgânica. Processos como humificação e melanização são responsáveis por imprimir coloração escura nos horizontes A de todos os pedons. O conteúdo de COT nos horizontes A são típicos de solos bem drenados da Puna peruana (Eash e Sandor, 1995; Miller e Birkeland, 1992; Wilcox et al. 1988). Horizontes Umbric foram reportados por Wilcox et al. (1988).

Não foi observado relação entre o aumento da altitude com a concentração de TOC em ambas as catenas. O microclima onde cada pedon foi formado também favorece a formação das fitofisionomias que produzem e aportam mais matéria orgânica nos solos, como é o caso do Bosque de Polylepis.

Tabela 4. Extração de Al, Fe e Si dos óxidos pedogenéticos (TFSA) e conteúdo de Fe total.

Pedon	Fe _p ¹	Al _p ¹	Fe _o ²	Al _o ²	Si _o ²	Fe _a ³	Al _d ³	Fe _t ⁴	Al _o + ½ Fe _o	Al _o - Al _p /Si _o	Fe _p / Fe _o	Al _p / Al _o	Fe _o / Fe _a	Al _o / Al _d	Fe _a - Fe _o /Fe _t
	----- % -----														
Llanganuco															
P1 - Haplic Umbrisol (Humic, Hyperdystric, Skeletic)															
Ah	0,09	0,26	0,13	0,26	0,07	0,28	0,26	1,43	0,33	0,00	0,69	1,00	0,46	1,00	0,11
2Ahb1	0,27	0,71	0,28	0,77	0,16	0,48	0,84	1,49	0,91	0,38	0,96	0,92	0,58	0,92	0,13
2Ahb2	0,46	1,10	0,37	1,07	0,25	0,66	1,02	1,62	1,26	-0,12	1,24	1,03	0,56	1,05	0,18
3C1	0,07	0,27	0,09	0,50	0,16	0,12	0,29	1,32	0,55	1,44	0,78	0,54	0,75	1,72	0,02
4C2	0,02	0,10	0,06	0,28	0,07	0,07	0,10	1,41	0,31	2,57	0,30	0,36	0,86	2,80	0,00
P2 - Haplic Umbrisol (Alumic, Humic, Hyperdystric, Skeletic)															
Ah	0,14	0,38	0,17	0,44	0,03	0,25	0,54	0,95	0,52	2,00	0,82	0,86	0,68	0,81	0,08
2Ahb	0,13	0,45	0,16	0,51	0,05	0,19	0,54	0,95	0,59	1,20	0,81	0,88	0,84	0,94	0,03
3C	0,09	0,22	0,09	0,21	0,04	0,19	0,26	1,08	0,26	-0,25	1,00	1,04	0,47	0,81	0,09
P3 - Haplic Umbrisol (Alumic, Humic, Hyperdystric, Skeletic)															
Ah	0,10	0,05	0,09	0,00	0,04	0,11	0,09	0,79	0,05	-1,25	1,11	0,00	0,82	0,00	0,03
2Ahb1	0,17	0,05	0,16	0,11	0,00	0,26	0,14	0,81	0,19	0,00	1,06	0,45	0,62	0,76	0,12
3Ahb2	0,12	0,08	0,09	0,03	0,04	0,13	0,15	0,85	0,08	-1,25	1,33	2,67	0,70	0,20	0,05
4Ahb3	0,08	0,05	0,03	0,05	0,03	0,07	0,10	0,90	0,07	0,00	2,67	1,00	0,43	0,50	0,04
4C	0,08	0,13	0,06	0,07	0,01	0,10	0,07	0,93	0,10	-6,00	1,33	1,86	0,60	1,00	0,04
5Ahb	0,15	0,30	0,14	0,28	0,06	0,28	0,57	1,02	0,35	-0,33	1,07	1,07	0,50	0,49	0,14
5C	0,10	0,12	0,11	0,14	0,01	0,10	0,14	0,98	0,20	2,00	0,91	0,86	1,00	1,40	0,03
P4 - Endogleyic Endostagnic Fluvisol (Humic, Orthodystric)															
Ah1	0,12	0,10	0,15	0,08	0,03	0,38	0,12	2,10	0,16	-0,60	0,80	1,25	0,40	0,67	0,10
2Ah2	0,15	0,13	0,24	0,14	0,06	0,36	0,27	2,40	0,26	0,17	0,63	0,93	0,67	0,52	0,05
2Ah3	0,09	0,14	0,29	0,17	0,08	0,30	0,28	2,64	0,32	0,38	0,31	0,82	0,97	0,61	0,00
P5 - Haplic Umbrisol (Hyperhumic, Hyperdystric, Skeletic)															
Ah	0,32	0,37	0,40	0,44	0,07	0,57	0,64	1,86	0,64	1,00	0,80	0,84	0,70	0,69	0,09
2Ahb1	0,66	0,96	0,62	0,76	0,02	0,98	1,03	2,10	1,07	-10,0	1,06	1,26	0,63	0,74	0,17
3Ahb2	0,11	0,54	0,15	0,59	0,11	0,16	0,75	1,72	0,66	0,46	0,73	0,92	0,94	0,79	0,01
4C	0,06	0,28	0,07	0,25	0,05	0,13	0,23	1,80	0,29	-0,60	0,85	1,12	0,54	1,09	0,03
P6 - Haplic Regosol (Hyperhumic, Eutric, Skeletic)															
2Ahb1	0,16	0,13	0,39	0,20	0,10	nd	nd	4,70	0,39	0,70	0,41	0,65	nd	nd	nd
3Ahb2	0,12	0,07	0,22	0,08	0,06	0,23	0,15	4,88	0,19	0,17	0,55	0,88	0,96	0,53	0,00
Portachuelo															
P7 - Haplic Leptosol (Humic, Dystric, Skeletic)															
Ah	0,11	0,28	0,71	0,42	0,08	0,79	0,45	7,31	0,78	1,75	0,16	0,67	0,90	0,93	0,01
2Ahb1	0,09	0,38	0,78	0,70	0,14	3,95	1,07	7,02	1,09	2,29	0,12	0,54	0,20	0,65	0,45
3Ahb2	0,21	0,59	0,84	0,84	0,15	1,70	0,94	6,67	1,26	1,67	0,25	0,70	0,49	0,89	0,13
4Ahb3	0,19	0,61	0,61	0,65	0,09	1,64	0,67	6,70	0,31	0,44	0,31	0,94	0,37	0,97	0,15

Continua

Continuação

P8 - Haplic Umbrisol (Hyperdystric, Humic, Skeletic)															
Ah	0,04	0,09	0,26	0,10	0,03	0,49	0,20	3,32	0,23	0,33	0,15	0,90	0,53	0,50	0,07
A/C	0,07	0,14	0,17	0,12	0,00	0,63	0,20	3,40	0,21	0,00	0,40	1,17	0,27	0,60	0,13
2Ahb1	0,19	0,25	0,30	0,25	0,07	0,50	0,37	3,22	0,39	0,00	0,63	1,00	0,60	0,68	0,06
2Ahb2	0,13	0,28	0,20	0,28	0,06	0,31	0,35	2,80	0,38	0,00	0,65	1,00	0,65	0,80	0,04
P9 - Haplic Umbrisol (Endodystric, Humic, Skeletic)															
Ah	0,41	0,41	0,70	0,58	0,06	0,70	0,62	4,14	0,93	2,83	0,59	0,71	1,00	0,94	0,00
2Ahb1	0,39	0,70	0,42	0,74	0,13	0,65	0,59	5,63	0,95	0,31	0,93	0,95	0,65	1,25	0,04
2Ahb2	0,14	0,24	0,22	0,44	0,14	0,30	0,37	5,82	0,55	1,43	0,63	0,54	0,73	1,19	0,01
2Ahb3	0,13	0,26	0,22	0,47	0,11	0,30	0,26	5,55	0,58	1,90	0,59	0,55	0,73	1,80	0,01
3C/R	0,08	0,13	0,24	0,12	0,00	0,56	0,12	5,49	0,24	0,00	0,33	1,08	0,43	1,00	0,06
P10 - Folic Umbrisol (Hyperhumic, Orthodystic, Skeletic)															
2Ahb1	0,45	0,19	0,44	0,18	0,04	0,63	0,31	2,16	0,40	-0,25	1,02	1,06	0,70	0,58	0,08
3Ahb2	0,72	0,49	0,85	0,40	0,04	1,36	0,45	4,64	0,83	-2,25	0,85	1,23	0,63	0,89	0,11
3Ahb3	0,32	0,35	0,54	0,30	0,08	0,82	0,46	4,57	0,58	-0,63	0,59	1,17	0,66	0,67	0,06
3Ahb4	0,46	0,39	0,72	0,42	0,07	0,90	0,59	5,46	0,78	0,42	0,64	0,93	0,80	0,71	0,03

¹ Pirofosfato de sódio ² Oxalato de amônio ³ Ditionito-Citrato-Bicarbonato ⁴ Fe total

Tabela 5. Material de origem dos pedons e dados qualitativos da mineralogia da fração argila.

Pedon	Material de origem¹	Minerais²
Llanganuco		
P1 - Haplic Umbrisol (Humic, Hyperdystric, Skeletic)		
Ah	FG	Q, A, KF, IM
2Ahb1	FG	Q, A, KF, IM
2Ahb2	FG	Q, A, KF, IM
3C1	FG	Q, A, KF, IM
4C2	FG	Q, A, KF, IM
P2 - Haplic Umbrisol (Alumic, Humic, Hyperdystric, Skeletic)		
Ah	FG	Q, A, KF, IM
2Ahb	FG	Q, A, KF, IM
3C	FG	Q, A, KF, IM
P3 - Haplic Umbrisol (Alumic, Humic, Hyperdystric, Skeletic)		
Ah	FG	Q, A, KF, IM
2Ahb1	FG	Q, A, KF, IM
3Ahb2	FG	Q, A, KF, IM
4Ahb3	FG	Q, A, KF, IM
4C	FG	Q, A, KF, IM
5Ahb	FG	Q, A, KF, IM
5C	FG	Q, A, KF, IM
P4 - Endogleyic Endostagnic Fluvisol (Humic, Orthodystric)		
Ah1	FG	Q, A, KF, IM
2Ah2	FG	Q, A, KF, IM
2Ah3	FG	Q, A, KF, IM
P5 - Haplic Umbrisol (Hyperhumic, Hyperdystric, Skeletic)		
Ah	FG	Q, A, KF, IM
2Ahb1	FG	Q, A, KF, IM
3Ahb2	FG	Q, A, KF, IM
4C	FG	Q, A, KF, IM
P6 - Haplic Regosol (Hyperhumic, Eutric, Skeletic)		
2Ahb1	FG + D	Q, A, KF, AN, ANF, IM, C
3Ahb2	FG + D	Q, A, KF, AN, ANF, IM, C
Portachuelo		
P7 - Haplic Leptosol (Humic, Dystric, Skeletic)		
Ah	BT + FG	Q, A, KF, IM, C
2Ahb1	BT + FG	Q, A, KF, IM, C
3Ahb2	BT + FG	Q, A, KF, IM, C
4Ahb3	BT + FG	Q, A, KF, IM, C
P8 - Haplic Umbrisol (Hyperdystric, Humic, Skeletic)		
Ah	FG + BT + D	Q, A, KF, AN, IM, C
2Ahb1	FG + BT + D	Q, A, KF, AN, IM, C
2Ahb2	FG + BT + D	Q, A, KF, AN, IM, C
P9 - Haplic Umbrisol (Endodystric, Humic, Skeletic)		
Ah	FG + BT + D	Q, A, KF, AN, IM, C
2Ahb1	FG + BT + D	Q, A, KF, AN, IM, C
2Ahb2	FG + BT + D	Q, A, KF, AN, IM, C
2Ahb3	FG + BT + D	Q, A, KF, AN, IM, C
P10 - Follic Umbrisol (Hyperhumic, Orthodistric, Skeletic)		
2Ahb1	FG + BT + D	Q, A, KF, AN, IM, EHE-E
3Ahb2	FG + BT + D	Q, A, KF, AN, IM, EHE-E
3Ahb3	FG + BT + D	Q, A, KF, AN, IM, EHE-E
3Ahb4	FG + BT + D	Q, A, KF, AN, IM, EHE-E

¹FG= Granodiorito; BT = Biotita tonalita; D= Diorito. ²Q= Quartzo, A= Albita, KF= Feldspato potássico, AN= Anortita, ANF= Anfibólio, IM= Ilita-Mica, C= Clorita, EHE-E= EHE-Esmectita.

A formação de complexos organometálicos por meio de quelação é o processo dominante que estabiliza grande parte do Fe e Al da solução dos solos aqui investigados. No processo de quelação, os cátions liberados durante o intemperismo são mobilizados por

combinar-se com ácidos orgânicos (Buurman e van Reeuwijk, 1984, Schaetzl e Anderson, 2005). Isto pode ser demonstrado pelos valores próximos a 1 das relações Fe_p/Fe_o e Al_p/Al_o para todos os pedons de ambas catenas (exceto P7).

O favorecimento da formação de complexos organometálicos em detrimento à outras formas de óxidos pedogenéticos pode também ser observado por meio dos elevados valores de Fe_o/Fe_d e Al_o/Al_d . De acordo com Schwertmann (1985) a formação de complexos organometálicos compete pelo Fe e Al e pode inibir a formação de óxidos bem cristalizados ou pobremente cristalizados.

O P7 em Portachuelo difere dos outros pedons devido sua pequena quantidade de Fe_p em todos os horizontes, o que infere a presença de ferridrita (Schwertmann, 1985). O mesmo pedon também tem o mais baixo valor da relação Fe_o/Fe_d , indicando maior quantidade de óxido de ferro cristalino em detrimento a ferridrita, o que sugere que parte das formas pobremente cristalizadas foram convertidas em formas cristalinas.

Valores acima de 1 para as relações Fe_p/Fe_o e Al_p/Al_o foram observadas em alguns pedons. Loveland e Bullock (1976) reportaram que o oxalato de amônio não é eficiente para extrair o Fe e Al associado com ácidos húmicos porque a pH próximo a 3 esta fração da matéria orgânica é ligeiramente solúvel.

Valores da relação Al_o/Al_d acima de 1 também foram reportados por Birkeland et al. (1989), Mahaney (1990) e Mahaney (2009). A extração de formas cristalinas de Al por ditionito de sódio não é eficiente (Childs et al, 1983), por esta razão este método não representa o total do Al pedogenético (Wada, 1977).

Alguns pedons com resultados de Al_o-Al_p/Si_o entre 1 e 2 não caracterizam a presença de minerais aluminossilicatos não cristalinos devido à baixa concentração de Si_o , uma vez que todo Si extraído pelo oxalato de amônio é proveniente de alofana e/ou imogolita (Childs et al., 1983). Além disto, os valores obtidos pela equação $Al_o+1/2Fe_o$ são menores que 2%, quantidade mínima requerida para indicar propriedades ândicas.

Além de processos vinculados a acumulação de matéria orgânica, estudos de solos nas altas montanhas dos Andes detectaram a ocorrência de outros processos que favorecem a formação de solos com maior grau de desenvolvimento, sob diferentes regimes de precipitação, variando entre 400 a 2.000-3.000 mm.

Miller e Birkeland (1992) e Miller et al (1993) encontraram solos com horizontes Bw e Bt no Back slope e Foot slope em dois vales num gradiente climático na Cordilheira Oriental (7-8°S), no norte do Peru. A precipitação entre os vales varia entre 2.000-3.000 a

1.000 mm e a altitude varia entre 3.400 até 4.500 m e não apresentam glaciares atualmente. Os trabalhos indicam que as encostas estudadas estão estáveis entre 8 e 12 ka.

Wilcox et al (1988) estudaram solos em Corpacancha, região norte do Peru (11 °S), em elevações entre 4.150 a 4.700 m, com aproximadamente 1.000 mm de precipitação. Encontraram Bt em solos localizados em encostas íngremes em um vale com montanhas glaciadas. Estes horizontes ocorrem apesar das diferenças de material de origem.

Eash e Sandor (1995) em Colca Valley, no lado oeste dos Andes no Sul do Peru, sob clima semiárido com precipitação média anual de 400 mm encontraram solos formados de andesito em encostas coluviais com horizontes argilosos, duripã e fragipã (Btqm e Btqkm). Os autores sugerem longo período de estabilidade das encostas para promover a formação de horizontes com translocação de argila.

Rodbell (1993) estudou 7 morainas da porção sudoeste da Cordilheira Blanca e encontrou solos com diferentes graus de desenvolvimento, que aumentava de acordo com a idade da moraina. Os solos formados em morainas holocênicas apresentam horizontes A/Cox/Cu. Em contraste, os solos desenvolvidos a partir de morainas pleistocênicas apresentam horizontes A/Bw/Cox/Cu.

Os solos investigados aqui diferem dos outros solos estudados nas altas montanhas do Peru porque possivelmente não tiveram tempo suficiente para se desenvolver e ocorrer diferenciação morfológica entre os solos das duas catenas. A sequência de horizontes A enterrados em cada pedon demonstra a instabilidade da encosta, onde os processos geomorfológicos foram favorecidos em detrimento aos processos pedológicos.

5.2. Intensidade do intemperismo

O intemperismo químico é distinto entre o gradiente climático oeste/seco e leste/úmido apesar dos pedons de ambas as catenas terem em comum os mesmos processos de formação de solos.

A identificação de apenas minerais primários na fração argila dos pedons em Llanganuco sugerem maior atuação do intemperismo físico. Por outro lado, a transformação de minerais primários em secundários (óxidos de ferro e argilas silicatadas) nos pedons do summit e back slope de Portachuelo evidenciam a maior intensidade de intemperismo químico.

A formação de ferro pedogenético no P7 (summit) pode estar associada com intemperismo da biotita, abundante mineral na biotita-tonalita que possui baixa estabilidade por ser um mineral trioctraedral (Allen e Hajek, 1989).

A concentração de óxidos de ferro pedogenéticos para avaliar o grau de intemperismo desconsiderando a mineralogia da fração argila poderia implicar em grandes erros, uma vez que foi identificada clorita geogênica em todos os horizontes do P7. Isto demonstra que este pedon não representa o grau máximo de intemperismo em relação a todos os pedons porque a clorita é um mineral facilmente intemperizável (Allen e Hajek, 1989). De acordo com Barnhisel e Bertsch (1989) e Schaetzl e Anderson (1995) a clorita é um mineral herdado do material de origem, formado pela alteração de anfibólio, piroxênio e biotita em rochas máficas que sofreram metamorfismo.

A expressão máxima de intemperismo nos pedons investigados foi encontrado no P10 sob bosque de *Polylepis* em Portachuelo. A identificação de EHE-Esmectita e a não identificação de clorita diferencia este pedon dos outros da mesma catena. EHE-Esmectita pode ser produto da alteração da clorita, uma vez que a clorita foi identificada em todos os pedons com similar material de origem. Além disto, a acidificação liberada pelos ácidos orgânicos complexantes poderia prevenir a formação de minerais com hidróxi de alumínio entre camadas. Egli et al. (2001, 2008) apontou que tanto o desenvolvimento do solo e a produção de ácidos pode aumentar a dissolução do hidróxi de alumínio, promovendo o intemperismo da clorita para EHE-Esmectita e depois para esmectita. A formação de EHE-Esmectita possivelmente foi favorecida pela estabilidade do ambiente. Sua posição numa encosta côncava com grandes blocos de rocha favorece a acumulação de água e estabelecimento do Bosque de *Polylepis* e conseqüentemente maior acumulação de matéria orgânica.

6. Conclusão

Os pedons de Llanganuco e Portachuelo apresentam os mesmos processos de formação de solos associados à acumulação de matéria orgânica, como humificação, melanização e formação de complexos organometálicos. São fracamente desenvolvidos, com seqüência de horizontes A enterrados e ausência de horizontes B. Em contrapartida, existe diferença na intensidade de intemperismo entre os pedons das duas catenas. A formação de óxidos de ferro e minerais secundários em alguns pedons de Portachuelo

sugerem que além do microclima, o material de origem e o clima regional controlaram a intensidade do intemperismo.

Outras investigações em solos de altas montanhas do Peru apresentaram solos com maior desenvolvimento devido a estabilidade da encosta, o que permitiu formação de horizontes Bt ou Bw (Miller e Birkeland, 1992; Miller et al, 1993; Rodbell, 1993; Wilcox et al, 1988). A instabilidade da área aqui estudada favorece os processos geomorfológicos em detrimento aos processos pedológicos que não permite tempo suficiente para maior desenvolvimento dos solos.

7. Referências bibliográficas

- Alexander, E.B. e Pichott, J.H. Soil organic matter in relation to altitude in equatorial Columbia. **Turrialba**, 29: 183-188, 1979.
- Allen, B.L., Hajek, B.F. Mineral occurrence in soil environments. In: Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.), **Minerals in soil environments**. Soil Science Society of America, Madison, Wi, pp. 199-278, 1989.
- Alvarez, V.H., Novais, R.F., Dias, L.E., Oliveira, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo** 25, 27-33, 2000.
- Arduino, E., Barberis, E., Carraro, F., Former, M.G. Estimating relative ages from iron-oxide/ total-iron ratios of soils in the Western Po Valley, Italy. **Geoderma** 33, 39-52, 1984.
- Barnhisel, R.I., Bertsch, P.M. Chlorites and hydroxy-interlayered vermiculite and smectite. In: Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.), **Minerals in soil environments**. Soil Science Society of America, Madison, Wi, pp. 729-788, 1989.
- Beek, K.J. e Bramaio, D.L. Nature and geography of South American soils. In: E.J. Fittkau, J. Illies, H. Klinge, G.H. Schwabe and H. Sioli, **Biogeography and Ecology in South America**. W. Junk Press, The Hague, pp. 82-112, 1968.
- Birkeland, P.W., Burke, R.M., Benedict, J.B. Pedogenic gradients for iron and aluminum accumulation and phosphorus depletion in Arctic and Alpine soil as a function of the time and climate. **Quaternary research** 32, 193-204, 1989.
- Buurman, P., van Reeuwijk, P. Proto-imogolite and the process of podzol formation: a critical note. **J. Soil Sci.** 35, 447-452, 1984.
- Cano, A., La Torre, M. I., Monsalve, C., Roque, J., Mendoza, W., Salinas, I., Castillo, S., Aponte, H. **Las plantas comunes de san marcos (Huari, Ancash) – Guía de campo**. Serie de divulgación n° 12, Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Museo de Historia Natural, 2005.
- Cano, A., Mendoza, W., Castillo, S., Morales, M., La Torre, M. I., Aponte, H., Delgado, A. Valencia, N., Vega, N. Flora y vegetación de suelos crioturbados y hábitats asociados em la Cordillera Blanca, Ancash, Perú. **Rev. Peru. Biol.** 17(1) 95-103, 2010.
- Childs, C.W., Parfitt, R.L., Lee, R. Movement of aluminium as an inorganic complex in some podsolized soils, New Zealand. **Geoderma** 29, 139-155, 1983.

- Cuesta, F., Peralvo, M., Valarezo, V. **Los bosques montanos de los Andes Tropicales: Una evaluación regional de su estado de conservación y de su vulnerabilidad a efectos del cambio climático.** Serie Investigación y Sistematización N°5. Programa Regional ECOBONA-INTERCOOPERATION. Quito. 73 pp, 2009.
- Drosdoff, M., Quevedo, F. e Zamora, C. Soils of Peru. Trans. **7th Int. Congr. Soil Sci.**, 4: 97-104, 1960.
- Eash, N.S., Sandor, J.A. Soil chronosequence and geomorphology in an arid valley in the Andes of southern Peru. **Geoderma** 65, 59-79, 1995.
- Egli, M., Mirabela, A., Fitze, P. Clay mineral formation in soils of two different chronosequences in the Swiss Alps. **Geoderma** 104, 145-175, 2001.
- Egli, M., Mirabella, A., Sartori, G. The role of climate and vegetation in weathering and clay mineral formation in late Quaternary soils of the Swiss and Italian Alps. **Geomorphology** 102, 307-324, 2008.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo.** 2ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 212 p., 1997.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. **Guidelines for soil description.** Fourth edition. Rome, 2006.
- Farber, D.L, Hancock, G.S., Finkel, R.C., Rodbell, D.T. The age and extend of tropical alpine glaciation in the Cordillera Blanca, Peru. **Journal of Quaternary Science** 20 (7-8), 759-776, 2005.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). **Huascarán. Generalidades y Diagnóstico.** Unidad Agrária Departamenta V, Ancash, Dirección de Parques Nacionales, Programa de Desarrollo Forestal, 1990.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). **Plan Maestro del Parque Nacional Huascarán 2003 – 2007,** 2003.
- IUSS-Working Group WRB. **World Reference Base for Soil Resources.** World Soil Resources Reports, 103, FAO, Rome. p. 128, 2006.
- Kaser, G., Ames, A., Zamora, M. Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru. International Glaciological Society. **Annals of Glaciology** 14, 136-140, 1990.
- Klimeš, J., Vilímek, V., Omelka, M. Implications of geomorphological research for recent and prehistoric avalanches and related hazards at Huascarán, Peru. **Nat Hazards** 50, 193-209, 2009.
- Loveland, P.J., Bullock, P. Chemical and mineralogical properties of Brown Podzolic soils in comparison with soils of other groups. **Journal Soil Science** 27, 523-540, 1976.
- Mahaney, W. C. **Ice on the Equator.** Wm Caxton, Ellison Bay, Wi. 387p, 1990.
- Mahaney, W.C., Kalm, V., Kapran, B., Milner, M.W., Hancock, R.G.V. A soil chronosequence in Late Glacial and Neoglacial moraines, Humboldt Glacier, northwestern Venezuelan Andes. **Geomorphology** 109, 236-245, 2009.
- McKeague, J.A. An evaluation of 0.1 M pyrophosohate and pyrophosphate-dithionite in comparison with oxalate as extractants of the accumulation products in podzols and some other soils. **Can. J. Soil Sci.** 47, 95–99, 1967.
- Mehra, O.P., Jackson, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals** 7, 317-327, 1960.

- Miller, D.C., Birkeland, P.W. Soil catena variation along an alpine climatic transect, northern Peruvian Andes. **Geoderma** 55, 211-223, 1992.
- Miller, D.C., Birkeland, P.W., Rodbell, D.T. Evidence for Holocene stability of steep slopes, Northern Peruvian Andes, based on soils and radiocarbon dates. **Catena** 20, 1-12, 1993.
- Milne, G. A provisional soil map of East Africa. East African Agriculture Research Station, Amani Memoirs, **Tanganyika Territory**, 1936.
- Monasterio, M., **La Alta Motaña de América Tropical. Estudios ecológicos en los ecosistemas de Páramo**. Mérida, Venezuela: Editorial da Universidade dos Andes. p.15, 1971.
- Monasterio, M. Los Páramos Andinos como región natural. Características biogeográficas generales y afinidad con otras regiones andinas. In: Monasterio, M. (Ed.), **Estudios Ecológicos en los Páramos Andinos**. Editorial da Universidade de Andes, Mérida, Venezuela, pp. 15-27, 1980.
- Monasterio, M., Vuilleumier, F. Introduction: High tropical mountain biota of the world. In: Vuilleumier, F., Monasterio, M. (Eds.), **High Altitude Tropical Biogeography**. Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 3-7, 1986.
- Munsell Soil Color Company. **Munsell soil color Charts**, New Windsor, NY, 2000.
- Nockolds, S.R. Average chemical compositions of some igneous rocks. **Geological Society of America Bulletin** 65, 1007-1032, 1954.
- Parfitt R.L., Furkert R.J., Henmi T. Identification and structure of two types of allophane from volcanic ash soils and tephra. **Clays and Clay Minerals** 28 (5), 328-334, 1980.
- Parfitt, R.L., Kimble, J.M. Conditions for formation of allophane in soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 53, 971-977, 1989.
- Petford, N. Artherton, M.P. Halliday, A.N. Rapid magma production rates, underplating and remelting in the Andes: isotopic evidence from northern-central Peru (9-11°S). **Journal South America Earth Science** 9, 69-78, 1996.
- Rodbell, D.T. Lichenometric and radiocarbon dating of Holocene glaciation, Cordillera Blanca, Peru. **The Holocene** 1, 19 – 29, 1992.
- Rodbell, D. T. Subdivision of Late Pleistocene moraines in the Cordillera Blanca, Peru, based on rock-weathering features, soils, and radiocarbon dates. **Quaternary Research** 39, 133-143, 1993.
- Ruhe, R. V. **Elements of the soil landscape**. Trans. 7th Intl Congr. Soil Sci. (Madison, WI) 4: 165-170, 1960.
- Ruiz, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **R. Bras. Ci. Solo** 29, 297-300, 2005.
- Sarmiento, G. Ecologically crucial features of climate in high tropical mountains. In: Vuilleumier, F., Monasterio, M. (Eds.), **High Altitude Tropical Biogeography**. Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 11-45, 1986.
- Sawhney, B.L., Stilwell, D.E. Dissolution and elemental analysis of minerals, soils, and environmental samples. In: Amonete, J.E., Zelazny, L.W. **Quantitative methods in soil mineralogy**. Soil Science Society of America. Madison, WI, pp. 49-82, 1994.
- Schaetzl, R.J. Lithologic discontinuities in some soils on drumlins: Theory, detection, and application. **Soil Science** 163, 570-590, 1998.

- Schaetzl, R.J., Anderson, S., **Soils Genesis and Geomorphology**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2005.
- Schwertmann, U. The differentiation of iron oxides in soil by extraction with ammonium oxalate solution. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd.* 105, 194-202, 1964.
- Schwertmann, U. The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals. **Adv. Soil Sci.** 1, 172-200, 1985.
- Silgado, E.F. **Historia de los sismos mas notables ocurridos en el Peru (1513–1974)**. Boletin No. 3 Instituto de Geologia y Minería, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica: 130, 1978.
- Silverio, W. **Atlas del Parque Nacional Huascarán – Cordillera Blanca – Perú**. Lima, p.72, 2003.
- Storie, R.E. Preliminary study of Bolivian soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 17: 128-131, 1953.
- Wada, K. Allophane and imogolite. In: Dixon, J. B. and Weed, S. B. **Mineral in soil environments**. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 1051-1087, 1997.
- Wilcox, B.P., Allen, B.L., Bryant, F.C. Description and classification of soils of the high-elevation grasslands of central Peru. **Geoderma** 42, 79-94, 1988.

CAPÍTULO 2

REGIME TÉRMICO E HÍDRICO DE SOLOS DE ALTA MONTANHA TROPICAL, CORDILHEIRA BLANCA – ANDES PERUANOS

Resumo

Este capítulo apresenta o comportamento térmico e hídrico de solos de alta montanha tropical, na Cordilheira Blanca, Andes peruano. Foi estabelecida uma catena na face leste do sistema montanhoso e instalados sensores de temperatura do ar e do solo e umidade em solos das fitofisionomias Roquedal (4.835 m), Pajonal (4.705 m) e Bosque de Polylepis (4.448 m). Os dados foram registrados de hora em hora, desde 16 junho de 2011 a 15 de junho de 2012. Os regimes diários da temperatura do solo observados nas três fitofisionomias foram de dias de congelamento e descongelamento (DCD) e dias de descongelamento (DD). A sazonalidade da precipitação e o microclima controlam a frequência destes regimes. A maior frequência de DCD está relacionada com o período seco, nos meses de julho a agosto de 2011 e junho de 2012. Nos outros meses ocorre aumento nos dias de descongelamento. No solo do Roquedal predominam DCD em todos os meses e no Pajonal e Bosque de Polylepis nos meses do período seco. A frequência de DD é maior no Bosque de Polylepis. Foram detectadas tendências nas amplitudes diárias da temperatura do solo influenciados pela insolação, nebulosidade e conteúdo de água. Nos períodos com amplitude térmica elevada, a umidade no solo é baixa. Em contrapartida, a amplitude térmica diminui com aumento da umidade. Uma série temporal de dados mais longa é necessária para análises conclusivas do comportamento da temperatura do solo entre as estações secas e úmidas devido os efeitos de alternância de El Niño e La Niña.

Palavras chave: Temperatura e umidade do solo, Roquedal, Pajonal de Puna, Bosque de Polylepis, Parque Nacional Huascarán.

1. Introdução

A temperatura do solo afeta, dentro de muitos aspectos, o crescimento das plantas, a atividade biológica e o movimento de água. Dados de temperatura do ar e solo são importantes para estimar taxas de evaporação, taxas de intemperismo de minerais e processos de congelamento e descongelamento dos solos (Schaeztl e Anderson, 2005). Da mesma forma a temperatura do solo reflete tendências de longo prazo, uma vez que possui nível de ruído inferior às leituras atmosféricas, podendo ser utilizadas para avaliar tendências do clima global (Gilichinsky et al., 1998).

Estudos realizados em alta montanha tropical no contexto de glaciares demonstram sua sensibilidade às mudanças climáticas (Kaser et al, 1990; Mark, 2008;). Cerca de 70% de toda a extensão de glaciares tropicais estão localizados no Peru. Dentre as montanhas dos Andes peruanos, a Cordilheira Blanca é a maior cadeia de montanhas glaciais tropical do mundo (Vuille et al., 2008). Estudos glaciológicos revelaram retração de glaciares da

Cordilheira Blanca no século passado. Os glaciares Huascarán e Chopicalqui diminuíram sua área aproximadamente em 20% entre 1920 a 1970 e o glaciar Artesonraju diminuiu em proporção semelhante entre 1962 a 2003 (Kaser et al., 1996; Raup et al., 2006).

Há uma notável lacuna nos estudos sobre mudanças climáticas e seus efeitos em solos (abaixo da linha de neve) nas altas montanhas tropicais comparado às áreas de alta latitude do hemisfério norte e sul. Por este motivo, o grupo TERRANTAR que monitora permafrost e mudanças climáticas dos solos da Antártica desde 2002 amplia seus estudos para áreas de alta montanha andina para estabelecer uma rede de monitoramento num grande transecto climático-latitudinal.

Neste sentido, a Cordilheira Blanca na sua porção nordeste denominada de Quebrada de Portachuelo é adequada para realizar estudos desta natureza porque contém os principais ambientes que ocorrem na cordilheira numa mesma encosta. Possibilitando, deste modo, análises em diferentes cotas altimétricas, fitofisionomias e classes de solos logo abaixo a linha de neve.

Deste modo, objetivo desta pesquisa foi monitorar a temperatura e umidade do solo em profundidade em três fitofisionomias da fachada leste da Cordilheira Blanca (Portachuelo) para compreender comportamentos influenciados por fatores macroclimáticos e microclimáticos.

2. Área de estudo

A Cordilheira Blanca está localizada no norte do Peru, no estado de Ancash (Figura 1). Tem extensão latitudinal de 8 a 11° S e longitudinal de 77 a 78° W, composta principalmente por um batólito de granodiorito félsico datado do Plioceno/Mioceno, composto por 69-73% de sílica, com diques de rochas básicas (Petford et al., 1996).

A precipitação média anual nos setores mais elevados pode chegar a 1.100 mm e nas baixas em torno de 600 mm (INRENA, 2003). A temperatura média anual é estratificada por pisos altitudinais de acordo com Silverio (2003): 2.400 – 3.500 = 13 °C; 3.500 – 4.000 = 8 °C and 4.000 – 4.800 = 3 °C. A linha de neve inicia-se a 5.000 metros de altitude. O regime é considerado isotérmico, com pouca variação da temperatura ao longo do ano. Porém, em função da latitude quase equatorial, existe uma forte variação diária na temperatura, com dias quentes e noites frias (INRENA, 2003).

O regime de precipitação é bi-estacional. A estação úmida ocorre entre outubro e abril e a estação seca entre maio a setembro. Devido às massas de ar quente e úmido provenientes da Bacia Amazônica, a face leste da Cordilheira Blanca recebe maior volume

de chuvas em relação a face oeste que é afetada por massas de ar frio e seco de anticiclones no oceano Pacífico, formados por influência da Corrente de Humboldt (Kaser et al., 1990).

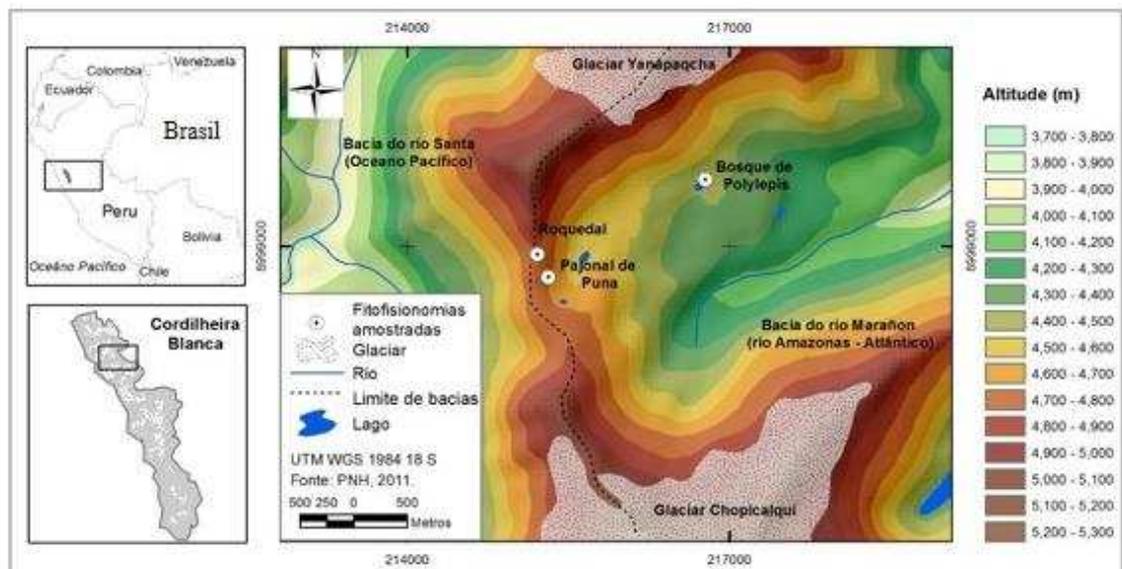


Figura 1. Localização dos sítios investigados na catena em Portachuelo, Cordilheira Blanca, Andes peruanos.

A Cordilheira Blanca está inserida no ecossistema Puna (INRENA, 1990). Nela podem ser encontradas as principais fitofisionomias da Puna peruana, como o Matorral com vegetação do tipo arbustiva, encontrada em encostas e vales entre 2.400 a 3.800 metros de altitude. O Pajonal é encontrado entre 3.800 a 4.800 metros de altitude e possui plantas principalmente da família Poaceae, como os gêneros Calamagrostis e Javara. O Roqedal ocorre entre 4.800 a 5.000 metros de altitude e é composto predominantemente pelas famílias Asteraceae, Poaceae and Brassicaceae (Cano et al., 2005; Cano et al., 2010). O Bosque de Polyleps, também conhecido como Queñuales, ocorre em fragmentos não contínuos entre 3.400 m a 4.800 m de altitude, próximos a cursos de água ou em áreas com muita rochoso. Predomina a família Rosaceae com espécies arbóreas. A floresta pode ser densa ou esparsa e a altura das árvores pode variar de 6 a 12 m de altura (Cuesta et al., 2009).

3. Material e métodos

3.1. Características dos sítios

A área selecionada para este estudo foi a face leste (bacia Amazônica) ao norte da Cordilheira Blanca, denominada Portachuelo (Figura 1). Foi estabelecida uma catena na mesma encosta englobando desde o limite abaixo da linha de neve (Roqedal - 4.835 m.),

a linha de gramíneas (Pajonal - 4.705 m.) até a linha de árvores (Bosque de Polylepis - 4.448 m.) (Tabela 1 e figuras 2, 3 e 4).

Tabela 1. Principais características topográficas e edáficas dos sítios investigados em Portachuelo.

Sítios	Localização	Posição na encosta	Elevação	Aspect	Declividade	Cobertura vegetal
	X/Y-UTM 18S		m	°N	%	%
Roquedal	215217/8998923	Topo	4.835	145 – Sudeste	5	10
Pajonal	215315/8998709	Terço superior	4.705	106 – Leste	60	80
Bosque de Polylepis	216777/8999676	Terço inferior	4.448	160 - Sul	25	95

Os solos das três fitofisionomias são formados por depósitos glacio/coluviais de natureza esquelética (pedregosos e cascalentos) e com predomínio das texturas areia franca, franca arenosa e franca (Tabela 2). Eles foram classificados de acordo com a FAO (2006): Roquedal Haplic Leptosol (Humic, Dystric, Skeletic), Pajonal Haplic Umbrisol (Hyperdystric, Humic, Skeletic) e Bosque de Polylepis Folic Umbrisol (Hyperhumic, Orthodystic, Skeletic). A porcentagem da cobertura vegetal foi estimada visualmente considerando os espaços com solo exposto ou rocha e com ocupação da vegetação e a nomenclatura das fitofisionomias estabelecidas de acordo com Cano et al., 2005; Cano et al., 2010.

3.2. Mensuração física e elaboração dos dados

Em cada sítio foram instalados sensores de temperatura do solo com acurácia de $\pm 0,2$ °C, nas profundidades 5 cm, 10 cm, 25 cm, 50cm e 100 cm. Sensores de temperatura do ar foram instalados a 1,5 m da superfície do solo. A profundidade de instalação dos sensores no solo e a altura do sensor de temperatura do ar adotada neste trabalho é um padrão estabelecido pelo grupo TERRANTAR para possibilitar futuras comparações com outros sítios de monitoramento na Antártica e nos Andes.

Para determinar o conteúdo de umidade foram instalados sensores de reflectometria (TDR) com acurácia de $\pm 2,5\%$, nas profundidades 10 cm, 25 cm, 50 cm e 100 cm. Todos os sensores foram conectados a data loggers Campbell Scientific CR 1000 que registrou dados com intervalos de hora em hora desde 16 junho de 2011 a 15 de Junho de 2012. As horas registradas são horas locais, UTC -5 horas.

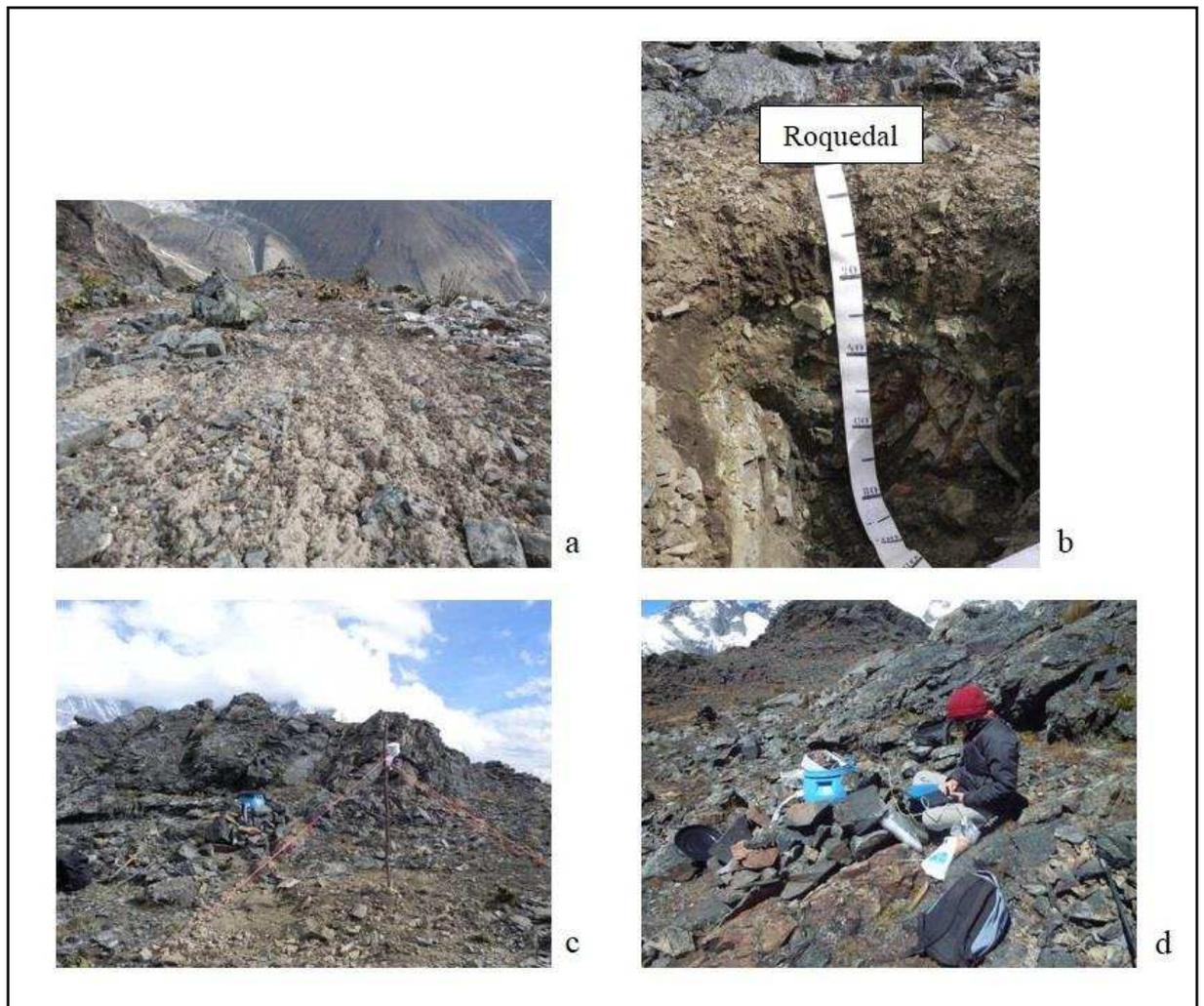


Figura 2. Sítio de monitoramento no Roqedal. a) Solifluxão na superfície do solo. b) Perfil do solo. c) Vista geral do Roqedal com os sistemas de sensores. d) Coleta dos dados do monitoramento em junho de 2012.

Para determinar os regimes diários da temperatura do solo foram calculados dias de congelamento e descongelamento (DCD) contabilizando o número de dias que possuem temperaturas negativas e positivas com pelo menos um valor maior que $\pm 0,5$ °C; dias de descongelamento (DD) contabilizando os dias em que todas as leituras de hora em hora são positivas e pelo menos uma leitura é mais quente que $+0,5$ °C; dias de congelamento (DC) contabilizando o número de dias em que todas as medições de hora em hora são negativas e pelo menos uma leitura é mais fria que $-0,5$ °C e dias isotérmicos (DI) contabilizando o número de dias em que todas as medições de hora em hora variam somente entre $\pm 0,5$ °C, todos de acordo com Guglielmin et al (2008). Para correlacionar a temperatura do ar e as diferentes profundidades do solo foram gerados gráficos de dispersão com o software R.

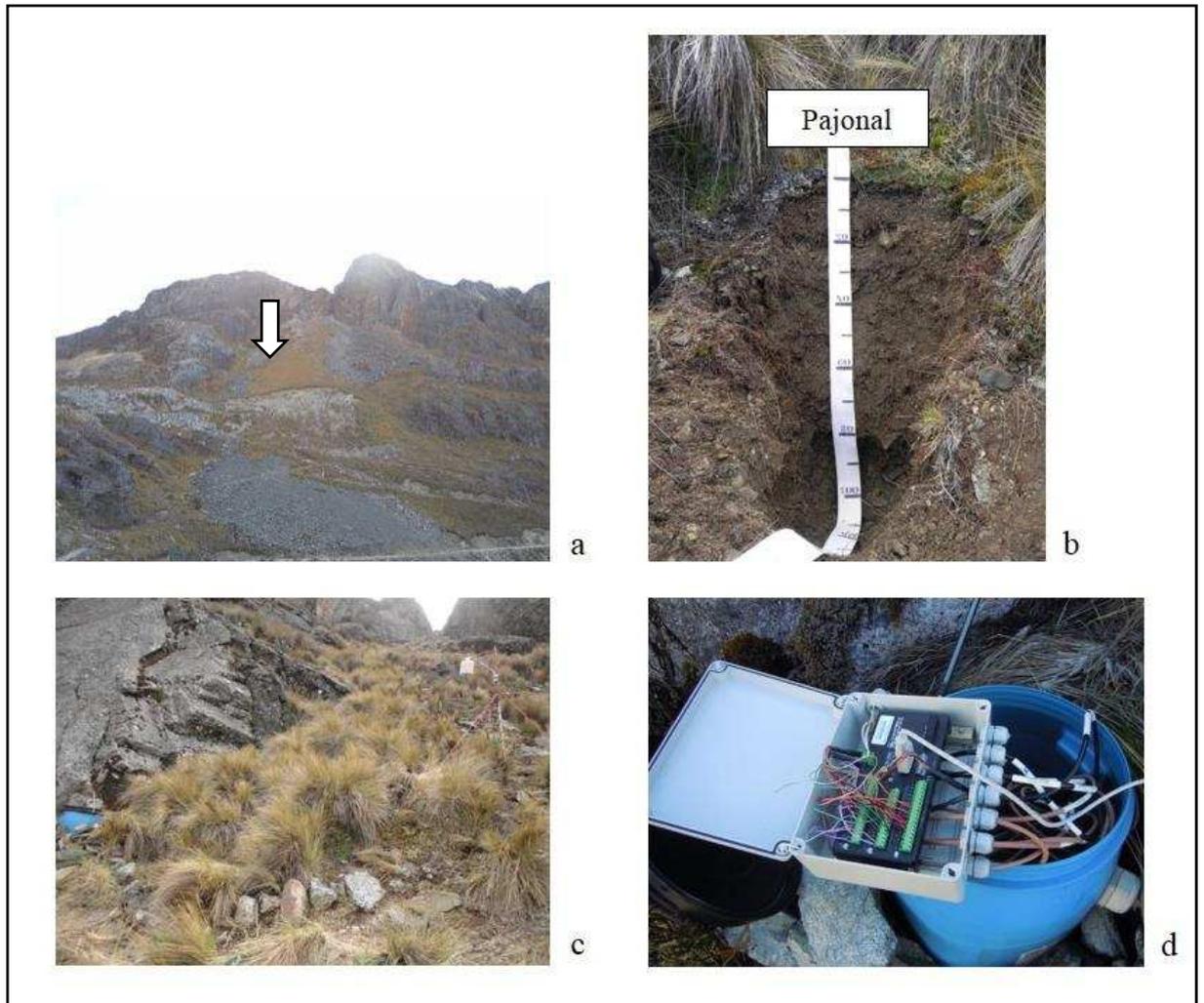


Figura 3. Sítio de monitoramento no Pajonal. a) Vista do Pajonal sobre talus. Localização do sítio indicado pela seta. b) Perfil do solo. c) Vista da encosta com os sistemas de sensores. d) Sensores conectados ao data logger.

4. Resultados

4.1. Médias mensal e anual da temperatura do ar e do solo

A temperatura média anual do ar mais baixa foi registrada no Roquedal com 0,74 °C. No Pajonal a média foi de 2,07 °C e no Bosque de Polylepis de 3,35 °C (Tabela 3). Os valores de desvio padrão (DP) entre os três ambientes são reduzidos, variam de 0,39 a 0,43, evidenciando a baixa variação da temperatura média do ar entre as estações do ano (junho de 2011 a junho de 2012).

A temperatura média anual do solo no Bosque de Polylepis foi a menor observada, variando de 3,87 °C a 4,38 °C (Tabela 3). Roquedal variou entre 4,19 °C a 4,53 °C e Pajonal de 4,39 °C a 5,07 °C. No Bosque de Polylepis e no Pajonal foi observado aumento da temperatura com aumento da profundidade. No entanto, no Roquedal a temperatura

superficial (5 cm) é ligeiramente maior do que as encontradas nas outras profundidades subjacentes.

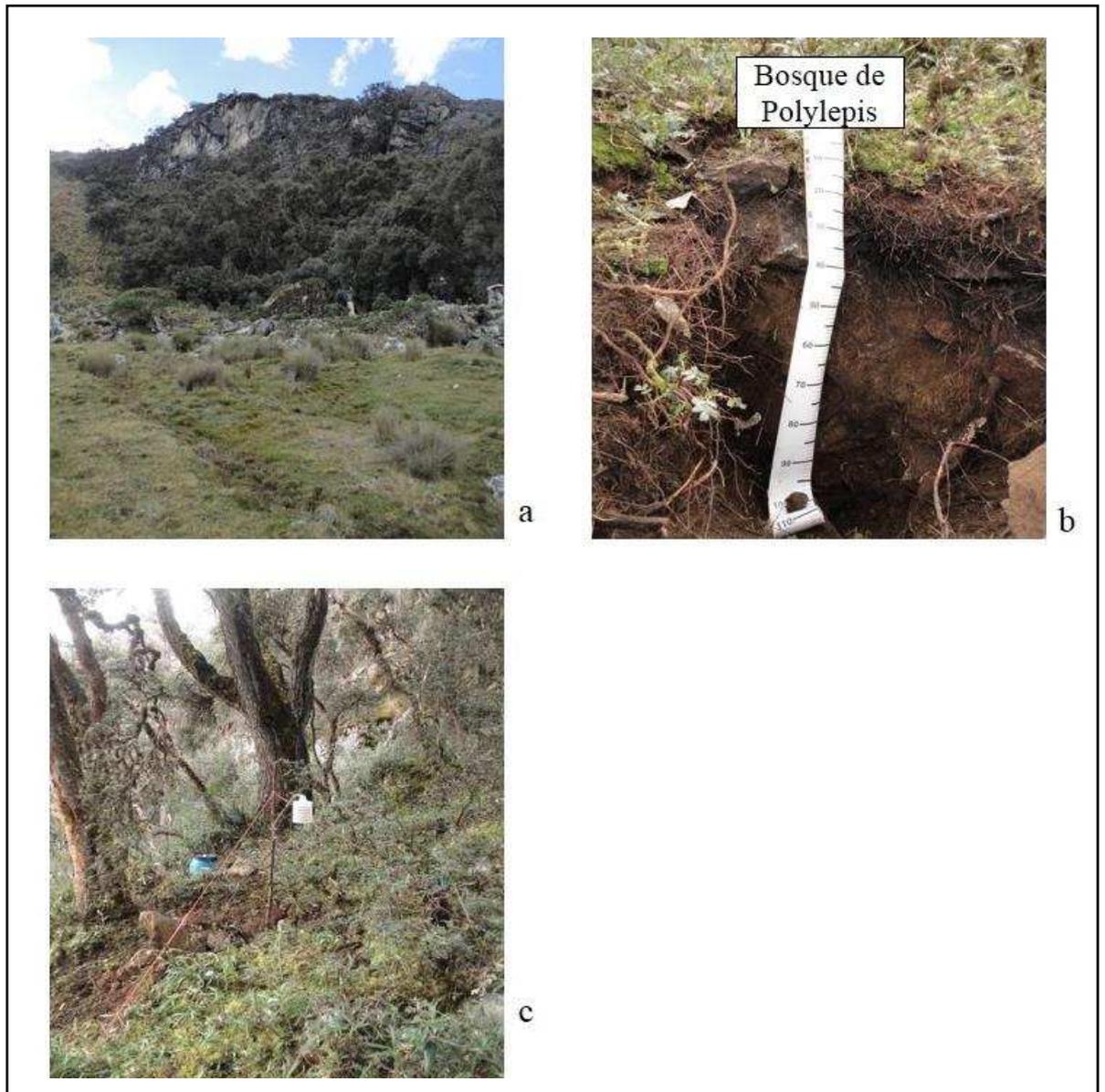


Figura 4. a) Vista frontal do Bosque de Polylepis. b) Perfil do solo. c) Interior do bosque e sistemas de sensores instalados.

A temperatura média anual do solo variou pouco ao longo do ano. Os baixos valores de DP para cada sítio também evidenciam a diminuição da variação em profundidade. O Bosque de Polylepis apresentou a menor variação térmica em relação aos outros sítios e em profundidade, com DP variando entre 0,33 a 0,49.

4.2. Regimes diários da temperatura do solo

A análise dos dados em profundidade da temperatura do solo permitiu detectar os regimes diários. Os três sítios de monitoramento em Portachuelo apresentaram dias de descongelamento e congelamento (DCD) e dias de descongelamento (DD). Não foram observados os regimes isotermal (DI) e de congelamento (DD).

O regime DCD ocorre nas três fitofisionomias (Tabela 4). A maior frequência foi observada no Roquedal, onde todos os meses do período analisado possuem grande quantidade de dias com ciclos de congelamento e descongelamento para todas as profundidades.

No mês de janeiro de 2012 houve uma queda nos dias de DCD no Roquedal, aumentando a quantidade de dias de DD (Tabelas 4 e 5). Foram registrados 15 dias de DD na profundidade de 5 cm. A temperatura do ar nestes dias fica abaixo de 0 °C nas primeiras horas do dia, porém a temperatura do solo nas diferentes profundidades tem menor variação diária, sendo todas positivas e acima de +0,5 °C (Figura 5).

Os meses com maior frequência de dias DCD em cada ambiente foram julho e agosto de 2011 e junho de 2012 (período seco) (Tabela 4). No Pajonal de Puna no regime de DCD a temperatura do solo na profundidade de 5 cm decresce abruptamente às 8:00 ao mesmo tempo que as profundidades subjacentes (Figura 5). As 12:00 se tornam positivas. E no Bosque de Polylepis todas as profundidades tornam-se negativas às 10:00, tornando-se positivas à partir de 12:00 horas.

No Pajonal e Bosque de Polylepis prevalece o regime DD nos outros meses analisados. No entanto, o regime DD ocorre com maior frequência na profundidade de 5 cm. O Bosque de Polylepis apresentou maior número de dias de regime DD em todos os meses do período analisado.

4.3. Variação diária e anual das temperaturas do ar e do solo

As maiores amplitudes térmicas diárias foram registradas no solo do Roquedal e as menores no Bosque de Polylepis. Padrões de sazonalidade considerando as oscilações diárias da temperatura do solo e do ar (Figuras 6, 7 e 8) foram detectadas ao longo do ano analisado. Nos três ambientes, a alta amplitude das temperaturas máximas e mínimas do ar e do solo coincide com meses do período seco, entre junho a setembro de 2011 e maio e junho de 2012. No entanto, foram registrados dias no mês de fevereiro de 2012 com alta variação. No restante dos meses foram detectadas as menores oscilações.

Tabela 2. Classes de solos, granulometria e COT de cada pedon investigado em Portachuelo.

Sítios	Horizontes	Profundidade cm	AG+AM ¹ ----- g/kg -----	AF ²	S ³	Arg ⁴	Classe textural ⁵	COT ⁶ g/kg
Roquedal - Haplic Leptosol (Humic, Dystric, Skeletic)								
	Ah	0-3	480	100	290	130	Franco arenosa	34,9
	2Ahb1	3-10/20	250	110	480	160	Franca	25,7
	3Ahb2	10/20-25	420	90	340	150	Franca	30,8
	4Ahb3	25-40	470	90	290	150	Franco arenosa	9,3
Pajonal – Haplic Umbrisol (Hyperdystric, Humic, Skeletic)								
	Ah	0-5	650	100	200	50	Areia franca	17,0
	A/C	5-15	660	120	170	50	Areia franca	13,0
	2Ahb1	15-60	670	80	200	50	Areia franca	20,0
	2Ahb2	60-80	600	120	190	90	Areia franca	14,8
Bosque de Polylepis - Umbrisol (Hyperhumic, Orthodistic, Skeletic)								
	Oi	0-10	270	40	380	310	Franco argilosa	411
	2Ahb1	10-20	330	110	340	220	Franca	183
	3Ahb2	20-40	370	140	300	190	Franca	41,2
	3Ahb3	40-70	410	150	270	170	Franco arenosa	25,6
	3Ahb4	70-90+	400	140	290	170	Franco arenosa	34,9

¹ Areia grossa + areia média 2.000 - 200 µm ² Areia fina 200 - 50 µm ³ Silte 50 - 2 µm ⁴ Argila < 2 µm. ⁵ Classe textural de acordo com FAO (2006). ⁶ Carbono orgânico total.

Tabela 3. Média mensal e anual da temperatura do ar e do solo (°C) e desvio padrão para os três sítios estudados no período de 16 de junho a 15 de junho de 2012.

	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Média	DP
Roquedal															
Ar	0,88	0,37	0,95	0,18	1,24	1,36	0,82	1,14	0,66	0,5	0,56	0,97	0,01	0,74	0,39
5 cm	5,32	4,41	6,69	3,57	6,14	4,42	3,53	5,57	4,01	2,62	2,64	4,93	4,43	4,53	1,23
10 cm	5,25	4,02	6,2	3,49	5,73	3,92	3,12	5,1	3,79	2,27	2,37	4,58	4,52	4,19	1,17
25 cm	5,20	4,28	6,2	3,73	5,56	4,1	3,38	4,83	3,87	2,66	2,53	4,39	4,55	4,26	1,02
50 cm	5,07	4,39	6,11	3,91	5,43	4,19	3,51	4,64	3,9	2,83	2,58	4,27	4,54	4,27	0,94
100 cm	5,07	4,41	5,89	4,15	5,26	4,3	3,66	4,44	3,92	3	2,64	4,07	4,4	4,25	0,84
Pajonal															
Ar	2,23	1,73	2,51	1,46	2,42	2,73	2,08	2,55	1,9	1,69	1,76	2,37	1,48	2,07	0,40
5 cm	3,32	2,57	4,18	4,01	5,66	5,97	5	6,64	5,32	3,96	3,82	4,01	2,61	4,39	1,16
10 cm	3,66	2,9	4,29	4,19	5,64	5,88	5,13	6,61	5,52	4,2	3,97	4,31	3,08	4,57	1,03
25 cm	4,20	3,46	4,77	4,48	5,87	6,04	5,43	6,79	5,8	4,51	4,17	4,74	3,66	4,92	0,92
50 cm	4,42	3,77	4,87	4,62	5,82	5,98	5,49	6,61	5,81	4,68	4,23	4,86	3,97	5,01	0,80
100 cm	4,66	4,17	4,88	4,78	5,62	5,8	5,46	6,21	5,78	4,88	4,34	4,94	4,39	5,07	0,59
Bosque de Polylepis															
Ar	3,31	2,78	3,56	2,95	3,98	4,08	3,54	3,77	3,34	3,28	3,24	3,37	2,4	3,35	0,43
5 cm	3,54	3,04	3,46	3,36	4,03	4,4	4,32	4,63	4,21	4,21	4,1	3,92	3,04	3,87	0,48
10 cm	3,69	3,19	3,47	3,46	4,15	4,49	4,47	4,76	4,42	4,37	4,27	4,1	3,27	4,01	0,49
25 cm	3,88	3,45	3,65	3,58	4,17	4,44	4,49	4,75	4,47	4,43	4,35	4,26	3,56	4,11	0,40
50 cm	4,15	3,78	3,79	3,77	4,24	4,45	4,64	4,84	4,66	4,61	4,57	4,52	3,98	4,31	0,35
100 cm	4,24	3,91	3,84	3,84	4,23	4,43	4,69	4,87	4,74	4,67	4,65	4,6	4,17	4,38	0,33

Tabela 4. Dias de congelamento e descongelamento (DCD) do solo e ar para os três sítios estudados no período de 16 de junho a 15 de junho de 2012.

Meses	Roquedal					Pajonal					Bosque de Polylepis							
	5	10	25	50	100	Ar	5	10	25	50	100	Ar	5	10	25	50	100	Ar
	----- cm -----						----- cm -----						----- cm -----					
Jul	31	28	28	25	26	31	23	27	27	25	23	31	19	19	17	16	16	27
Agos	30	19	23	15	19	31	22	25	26	26	26	31	21	22	22	20	20	20
Set	27	18	19	15	16	29	7	17	17	14	13	30	8	10	9	8	7	15
Out	25	19	20	16	17	31	9	19	19	17	19	31	3	8	7	5	6	8
Nov	27	24	23	18	15	30	5	16	17	15	15	29	0	1	1	1	1	7
Dez	25	23	22	20	17	31	2	14	15	12	12	31	1	2	2	2	2	12
Jan	16	19	21	18	18	30	0	15	20	17	16	30	1	1	1	1	1	7
Fev	24	19	20	20	18	28	2	14	15	10	10	28	0	2	2	1	1	8
Mar	31	23	22	19	17	31	1	7	13	10	7	31	1	1	1	1	1	10
Abr	28	25	21	21	21	30	1	14	16	12	13	30	1	2	2	1	1	5
Mai	27	21	24	20	22	31	9	21	22	19	19	31	10	12	12	5	6	7
Jun	30	29	29	28	29	30	25	30	30	30	28	30	19	20	20	17	16	29

Tabela 5. Dias de descongelamento (DD) do solo e ar para os três sítios estudados no período de 16 de junho a 15 de junho de 2012.

Meses	Roquedal					Pajonal					Bosque de Polylepis							
	5	10	25	50	100	Ar	5	10	25	50	100	Ar	5	10	25	50	100	Ar
	----- cm -----						----- cm -----						----- cm -----					
Jul	0	3	3	6	5	0	8	4	4	6	8	0	12	12	14	15	15	4
Ago	1	12	8	16	12	0	9	6	5	5	5	0	10	9	9	11	11	11
Set	3	12	11	15	14	0	23	13	13	16	17	0	22	20	21	22	23	15
Out	6	12	11	15	14	0	22	12	12	14	12	0	28	23	24	26	25	23
Nov	3	6	7	12	15	0	25	14	13	15	15	1	30	29	29	29	29	23
Dez	6	8	9	11	14	0	29	17	16	19	19	0	30	29	29	29	29	19
Jan	15	12	10	13	13	1	31	16	11	14	15	1	30	30	30	30	30	24
Fev	5	10	9	9	11	1	27	15	14	19	19	1	29	27	28	28	28	21
Mar	0	8	9	12	14	0	30	24	18	21	24	0	30	30	30	30	30	21
Abr	2	5	9	9	9	0	29	16	14	18	17	0	29	28	28	29	29	25
Mai	4	10	7	11	9	0	22	10	9	12	12	0	21	19	21	26	25	24
Jun	0	1	1	2	1	0	5	0	0	0	2	0	11	10	11	13	14	1

4.4. Relação entre a temperatura do ar e as diferentes profundidades do solo

A mensuração da temperatura do solo em diferentes profundidades durante um ano permitiu obter informações sobre seus fluxos de energia dentro do perfil. O comportamento de transmissão de energia entre o ar e as profundidades subjacentes do solo é distinta entre os três sítios (Figuras 9, 10 e 11). No Roquedal a relação entre a temperatura do ar e às profundidades 5 cm a 25 cm demonstra que a transferência de energia não foi eficiente, evidenciada pela alta dispersão nos gráficos. De 25 cm a 100 cm as temperaturas registradas

foram muito próximas o que indica eficiência na transferência de energia. No Pajonal a partir de 10 cm as profundidades subjacentes registraram temperaturas próximas umas das outras. A difusão térmica do Bosque de Polylepis foi a mais eficiente, apenas com correlação baixa entre a temperatura do ar e o solo a 5 cm de profundidade.

4.5. Umidade do solo

A variação do conteúdo de umidade no solo nas três fitofisionomias apresenta comportamento sazonal, com períodos mais secos e mais úmidos (Figuras 12, 13 e 14). Nos meses de junho a setembro de 2011 e maio a junho de 2012 os solos possuem menor conteúdo de água. A quantidade de umidade aumenta a partir de setembro de 2011, coincidindo com a estação chuvosa da região.

No entanto, o conteúdo de umidade é diferente entre os três ambientes. O solo do Bosque de Polylepis (Figura 14) possui maior quantidade de água, variando de $0,07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ a $0,43 \text{ m}^3/\text{m}^3$. A profundidade de 25 cm apresenta a maior quantidade ao longo do ano. O solo do Pajonal é o mais seco, com umidade variando de $0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ a $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$. As profundidades de 25 cm a 50 cm são as que mantêm maior umidade e o Roquedal tem comportamento distinto dos demais, sendo que a profundidade de 10 cm possui maior quantidade de umidade do que no restante das profundidades monitoradas. A umidade no solo do Roquedal varia de $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ a $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

5. Discussão

Regiões próximas à linha do Equador recebem a maior quantidade de radiação solar do planeta. A radiação solar incidente possui trajetória curta porque seu ângulo se aproxima de 90° . Além da localização geográfica, a altitude potencializa ainda mais a quantidade de radiação solar incidente. Em alta altitude a atmosfera é menos densa e produz menor interação de suas moléculas com a radiação solar (Schaetzl e Anderson, 2005).

Sarmiento (1987) constatou que dentro dos trópicos, próximo à linha do equador, a quantidade de radiação solar na porção norte e sul das encostas são iguais ao longo do ano, mas podem diminuir com a presença de nuvens e neblinas.

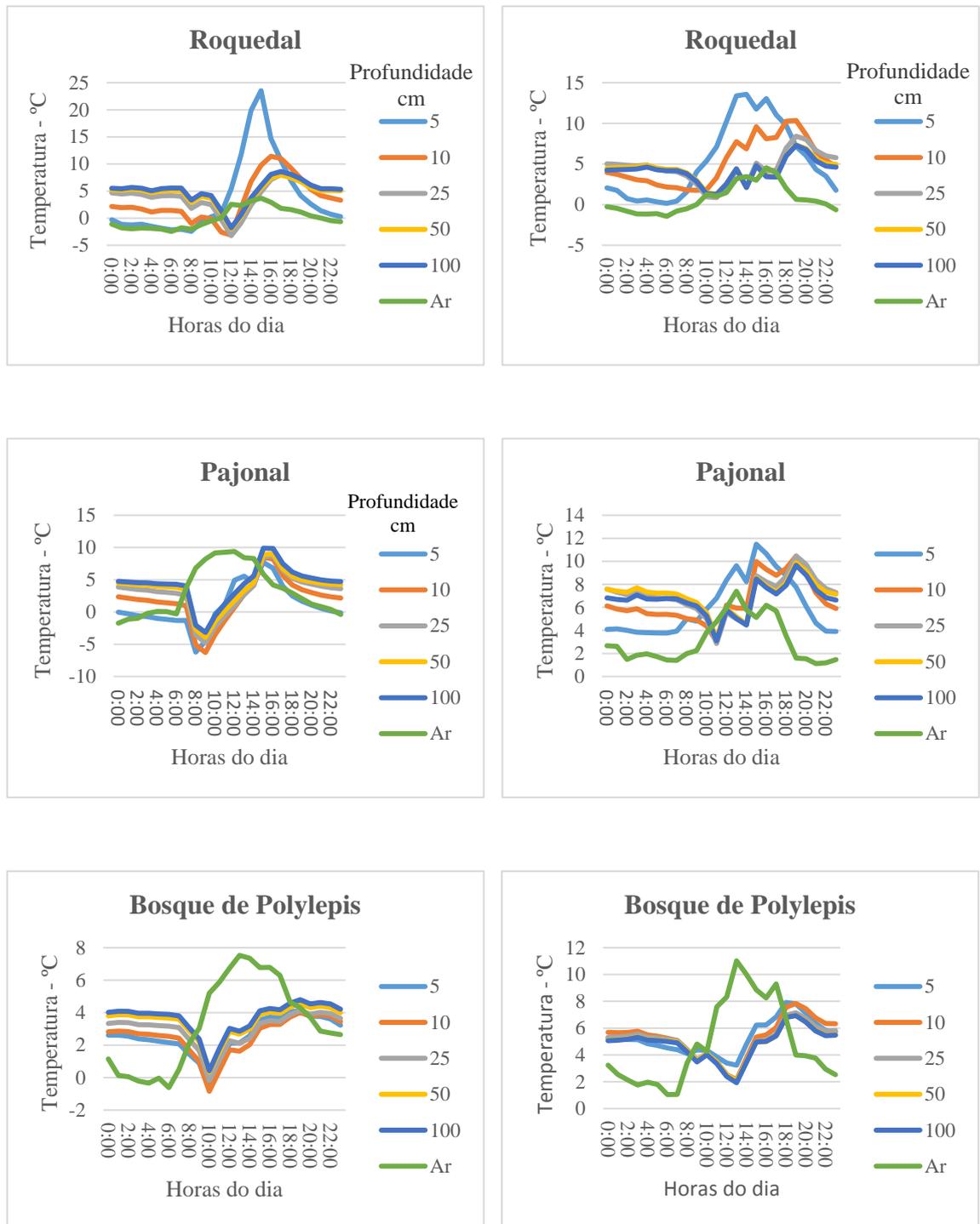
CDC**DD**

Figura 5. Regimes diários de temperatura do solo observados para cada fitofisionomia. Seleção dos regimes: Dias do mês de julho para regime DCD e dias mês de julho para regime DD.

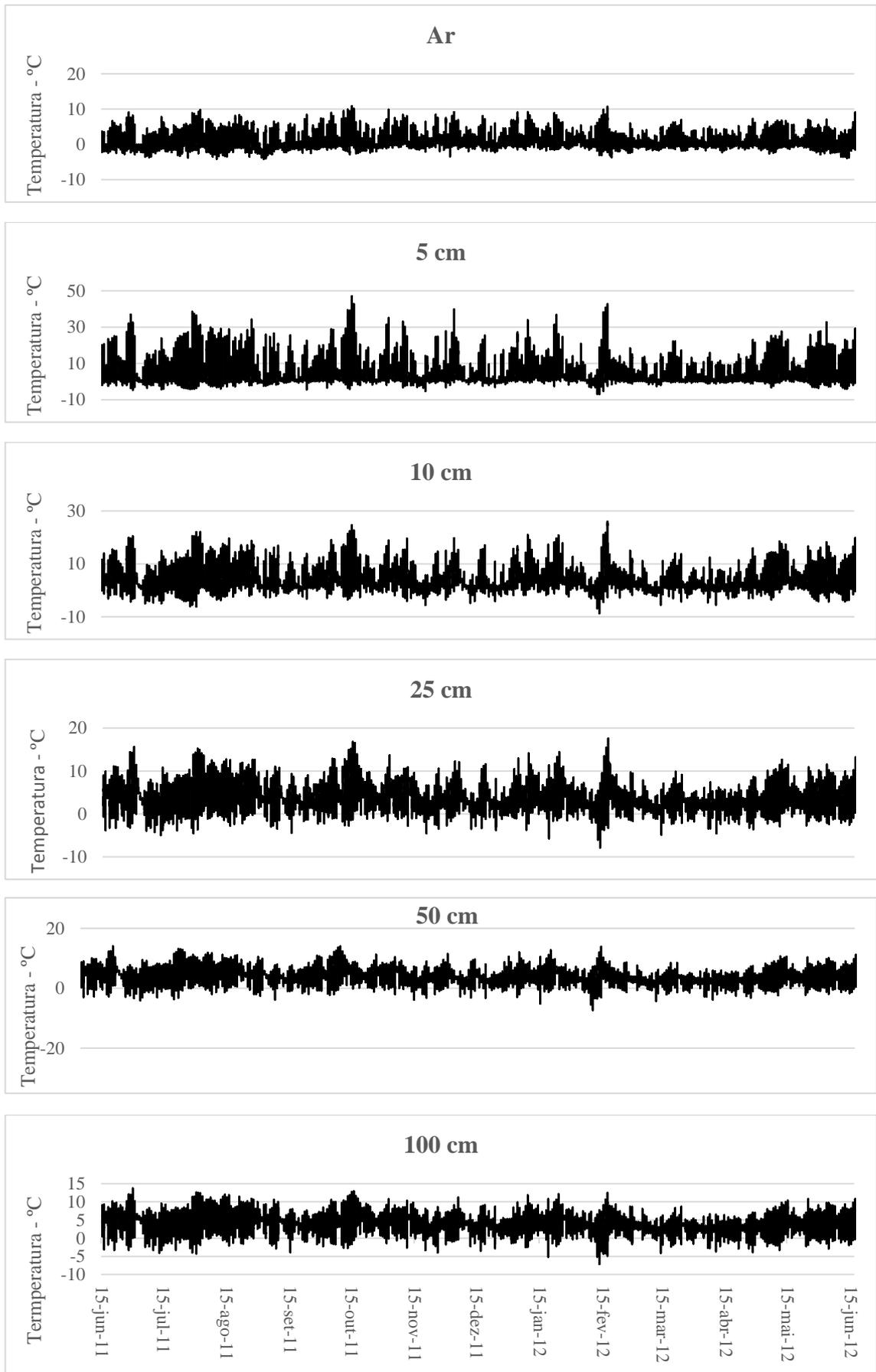


Figura 6 – Variação da temperatura do ar e do solo no Roquedal.

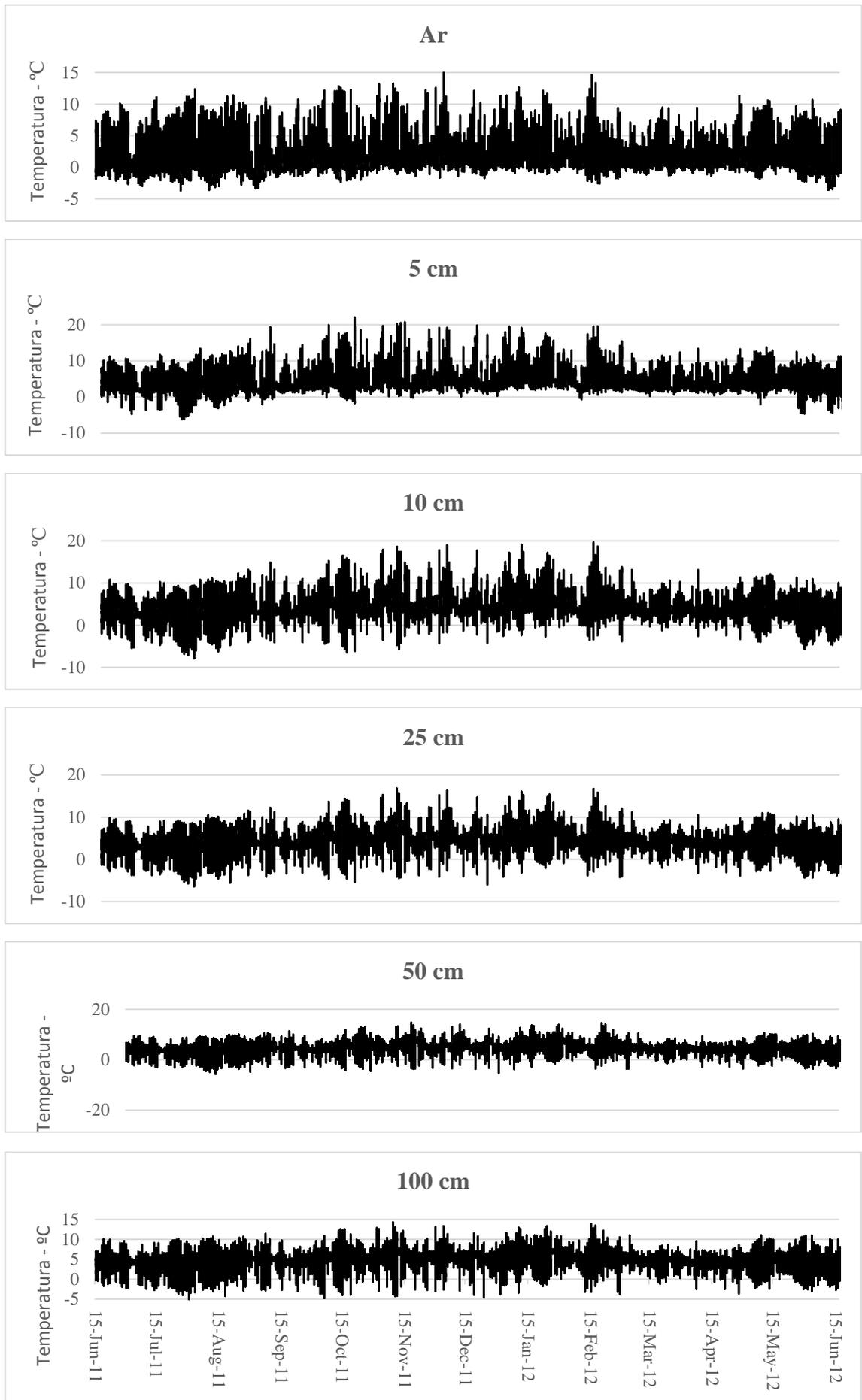


Figura 7 – Variação da temperatura do ar e do solo no Pajonal.

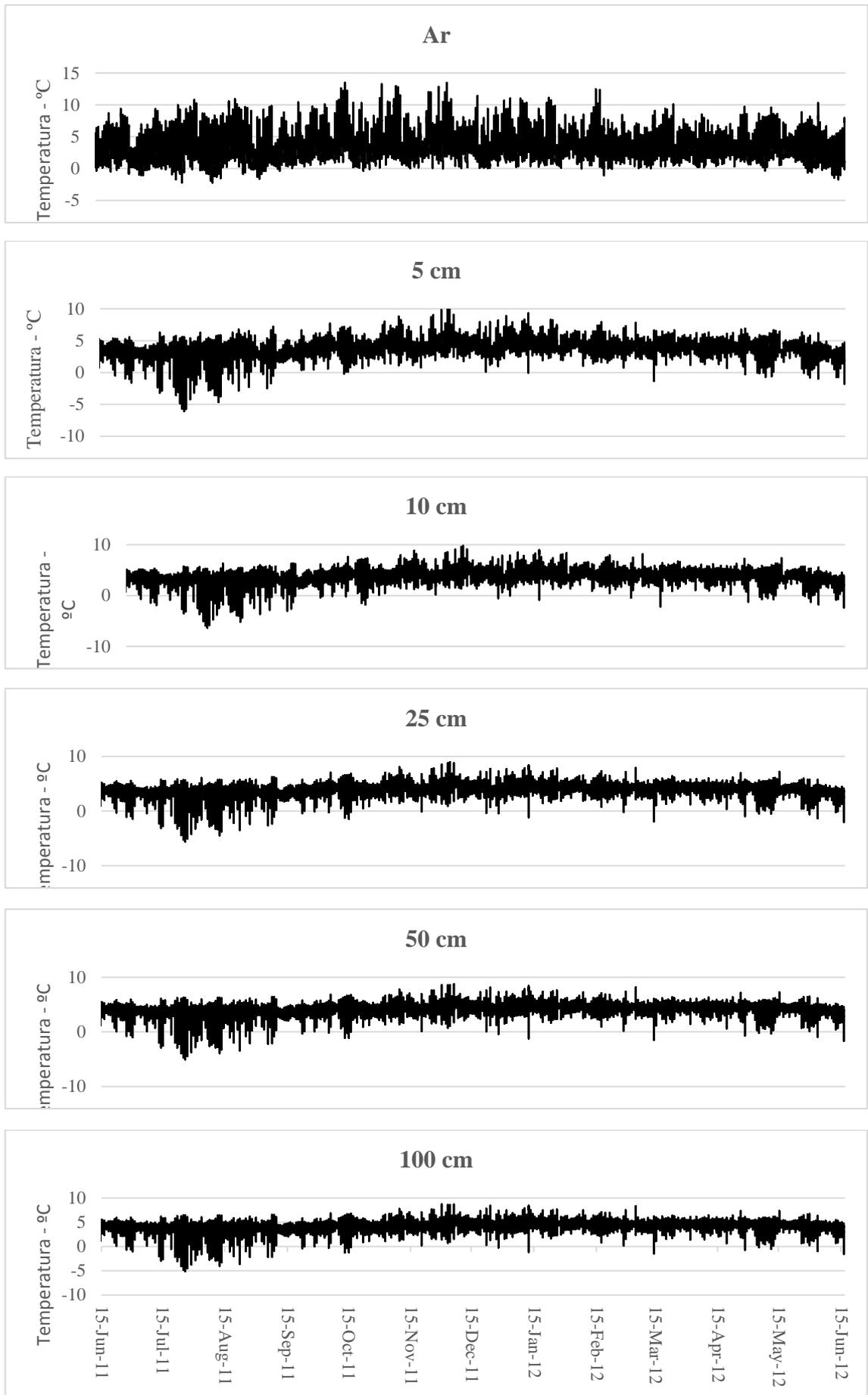


Figura 8 – Variação da temperatura do ar e do solo no Bosque de Polylepis.

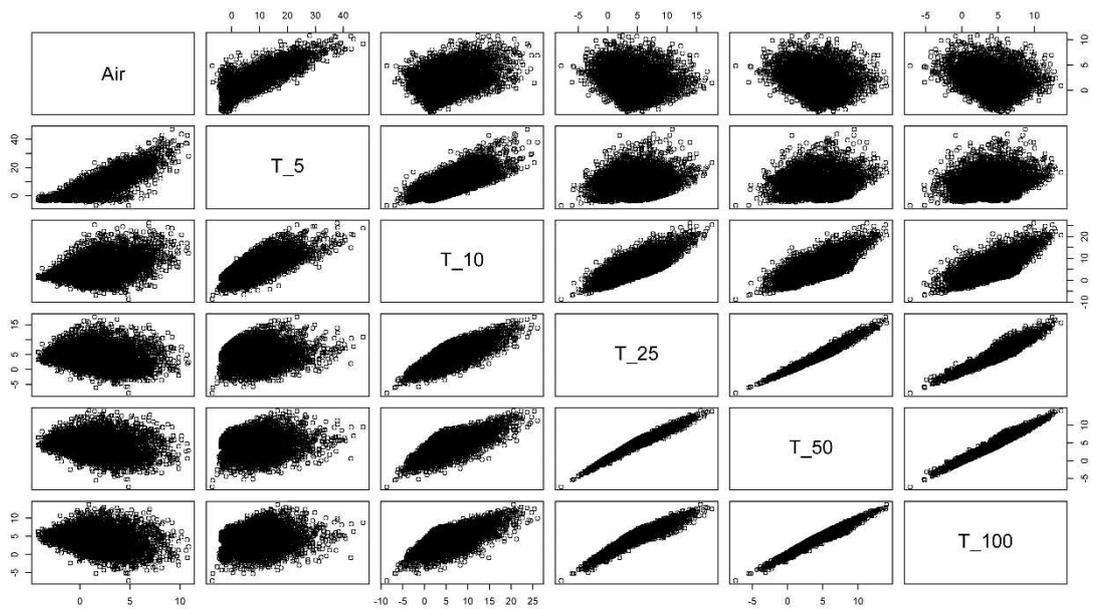


Figura 9. Correlações entre a temperatura do ar e as diferentes profundidades registradas no período de 16 de junho a 15 de junho de 2012 no Roquedal.

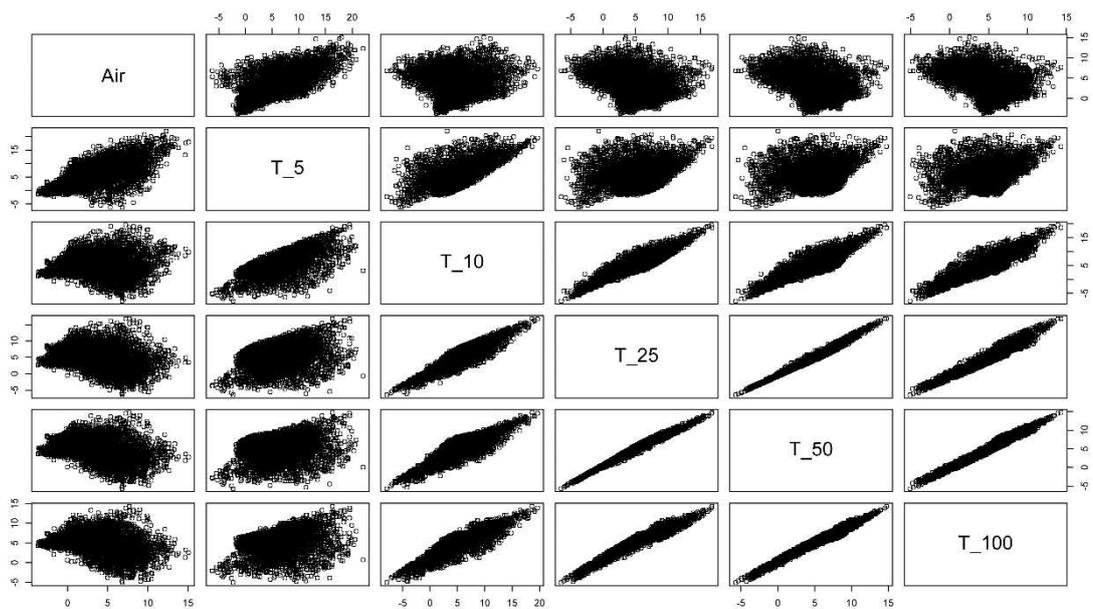


Figura 10. Correlações entre a temperatura do ar e as diferentes profundidades registradas no período de 16 de junho a 15 de junho de 2012 no Pajonal.

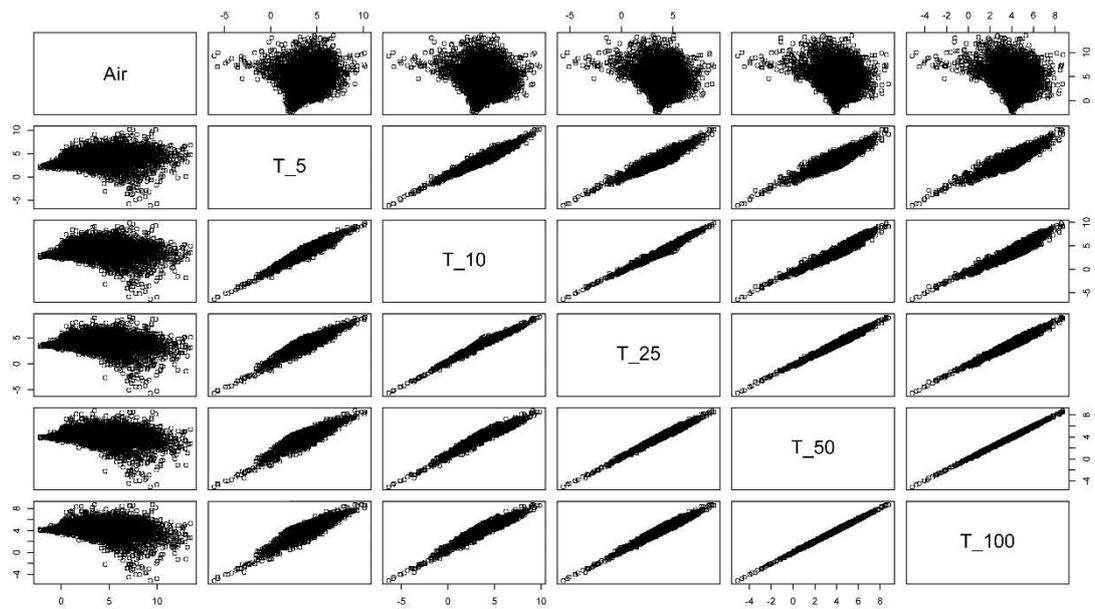


Figura 11. Correlações entre a temperatura do ar e as diferentes profundidades registradas no período de 16 de junho a 15 de junho de 2012 no Bosque de Polylepis.

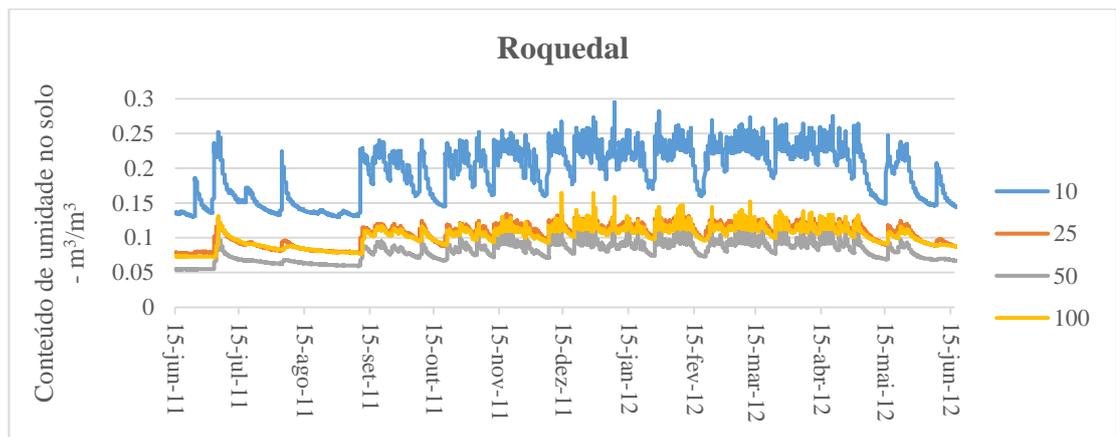


Figura 12 – Conteúdo de umidade no solo (m^3/m^3) no Roqedal.

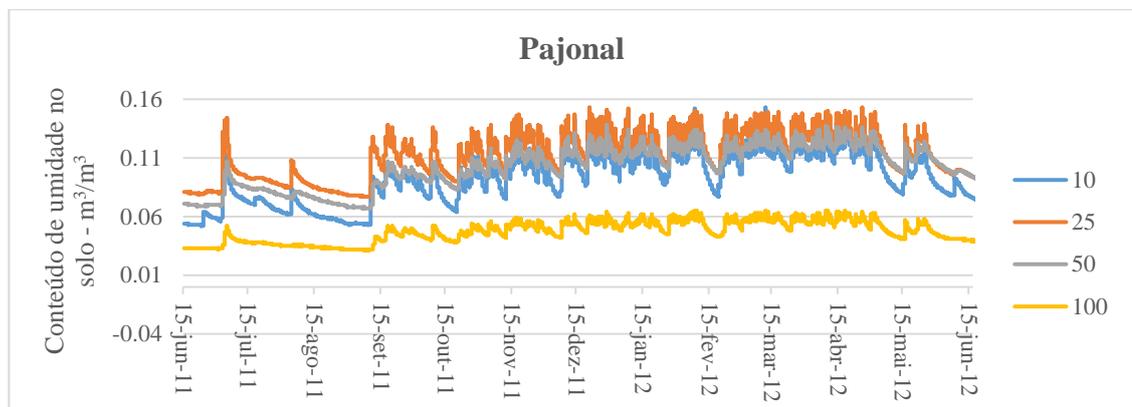


Figura 13 – Conteúdo de umidade no solo (m^3/m^3) no Pajonal.

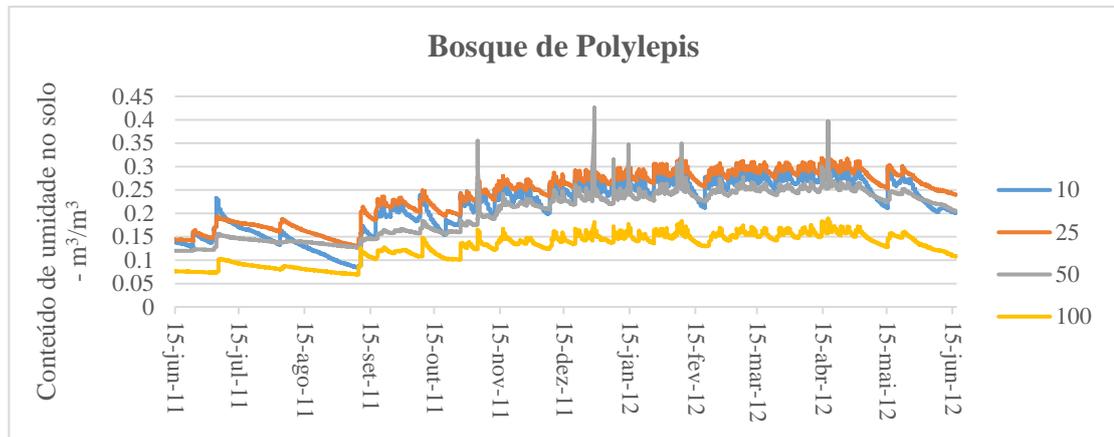


Figura 14 – Conteúdo de umidade no solo (m^3/m^3) no Bosque de Polylepis.

A combinação destas características tem influência na ocorrência de regimes de DCD e DD. Além disto, a sazonalidade entre os períodos chuvosos e secos influencia nas amplitudes diárias da temperatura, exibindo um padrão de alternância de comportamentos comum a todos os ambientes.

Nos períodos onde a amplitude da temperatura é alta, a quantidade observada de umidade no solo é baixa. Em contrapartida, quando ocorre aumento de umidade a amplitude termal diminui. A maior umidade proporciona um efeito tampão na variação da temperatura pois a água é melhor armazenadora de calor do que o ar (Schaeztl e Anderson, 2005).

O estudo de Hellström et al. (2010) estimou a quantidade de evapotranspiração em diferentes porções do vale Llanganuco, localizado a leste do vale Portachuelo, entre 2006 e 2007. Seus resultados revelam que o ciclo diurno de evapotranspiração é controlado pela insolação. O solo a 4.750 m de altitude tem alta taxa de evapotranspiração no período seco, cerca de 2 mm/h. No período úmido, a evapotranspiração diminui para 1,7 mm/h devido a cobertura de nuvens.

A topografia e grau de exposição também exercem controle na quantidade de radiação que incide sobre cada fitofisionomia. De acordo com Sarmiento (1987), as condições locais das montanhas são responsáveis pelas diferenças de insolação entre as porções leste e oeste. O solo localizado no Roquedal, que foi a fitofisionomia mais alta estudada aqui, recebe maior quantidade de energia solar durante o dia. Por outro lado, o solo localizado no Pajonal e no Bosque de Polylepis são sombreados pela montanha no período vespertino, quando o sol se desloca para o oeste.

O solo do Roquedal que tem maior frequência de dias DCD em todas as profundidades e maior amplitude diária da temperatura, revelando um regime semelhante ao periglacial. Ele possui cobertura vegetal esparsa, o que induz o aumento da sua superfície

de contanto para interação com a radiação solar incidente. Nos primeiros 5 cm de profundidade, a amplitude térmica é maior em relação as profundidades subjacentes.

A correlação entre as temperaturas das menores profundidades com as maiores no período de um ano revelam alta dispersão próximas à superfície do solo, entre 5 cm a 25 cm. Em períodos prolongados de dias secos, quando a umidade do solo está acima de $> 0.17 \text{ m}^3/\text{m}^3$, a temperatura do ar e solo a 5 cm de profundidade ficam abaixo de 0°C . A partir das 11:00 horas aumentam e ficam acima de 0°C , enquanto nas profundidades subjacentes ocorre um decréscimo na temperatura chegando a -3°C . As 13:00 horas as profundidades subjacentes aquecem e ficam positivas. Este comportamento foi observado apenas em períodos secos seguido de chuvas ou em períodos úmidos quando havia dias sem chuvas e depois tornava a chover.

A presença de pequenos eventos de solifluxão no Roquedal pode estar relacionada a estes comportamentos. Foram observados solos estriados no Roquedal nas campanhas de campo de junho de 2011 e junho de 2012. Feições periglaciais semelhantes foram observadas também na superfície de solos nos Andes tropicais. Nos páramos da Venezuela a 4.700 m (Pérez, 1987), nos Andes da Bolívia acima de 4.700 m (Francou et al., 2001) e nos Andes Peruanos acima de 4.600 m (Hastenrath, 1977). Estas feições estão associadas à ocorrência de dias de congelamento e descongelamento devido à segregação do gelo e o derretimento da camada superficial do solo. (Viera et al., 2003).

Vieira et al. (2003) estudando regimes de temperatura do solo e suas implicações geomorfológicas na Serra da Estrela, Portugal, identificou dias de regime com DCD em superfície e DC em sub-superfície coincidindo com a presença de solifluxão de baixa intensidade na superfície dos solos. Este fenômeno estava associado à precipitação sobre camadas congeladas de solos acima de 1.700 m de altitude.

O regime diário do Roquedal é DCD para todas as profundidades, diferente do regime diário observado na Serra da Estrela. Apenas algumas horas do dia em que a temperatura da superfície está acima de 0°C e abaixo na camada subsuperficial permitem a ocorrência de solifluxão.

O Roquedal a 4.850 m de altitude não representa atualmente um ambiente periglacial stricto sensu, mesmo apresentando solifluxão. Ele não apresenta permafrost, requisito indispensável para caracterizar um ambiente periglacial (French, 1996). Contudo, a presença de feições periglaciais indica uma possível ocorrência pretérita de permafrost, já que todas as encostas estudadas possuem depósitos vinculados à ação glacial pretérita.

A baixa amplitude diária da temperatura e a alta frequência de regimes DD no Bosque de Polylepis são controladas pelo ambiente ombrófilo abaixo da copa das árvores e pela camada de 20 cm de serrapilheira que atuam como isolantes. O dossel intercepta grande parte da radiação solar e a serrapilheira controla o fluxo de energia para dentro e para fora do pedon.

A temperatura do ar não correlaciona bem com a temperatura do solo a 5 cm. No entanto, a transferência de energia é eficiente entre as profundidades do solo devido ao conteúdo de água e matéria orgânica. De acordo com Schaetzl e Anderson (2005), o calor específico alto da água e intermediário da matéria orgânica os tornam eficientes para a transferência de energia no solo.

Além disto, o Bosque de Polylepis é o ambiente mais estável aqui analisado em virtude de sua posição no centro de uma encosta côncava com muitos blocos de tamanhos variados. O relevo favorece o acúmulo de água no solo e é responsável pelo abastecimento de uma nascente dentro do bosque. Além disto, estas características potencializam a intensidade do intemperismo químico deste solo, analisado no capítulo 1. A umidade disponível aliada à matéria orgânica aceleram processos de transformação de minerais e formação de complexos organometálicos.

A posição na paisagem do solo sob Pajonal é a mais instável dentre os ambientes estudados pois situa-se num talus rochoso, localizado no terço superior de encosta com 60% de declividade. Além do relevo, a textura (areia franca), a composição florística graminosa e o menor aporte de matéria orgânica reduzem sua capacidade de retenção de água que afeta o comportamento térmico do solo. Por consequência, no período seco foi observado elevada amplitude diária da temperatura e regime DCD. Em contrapartida, com aumento de umidade no solo nos períodos chuvosos o transporte de energia é potencializado.

6. Conclusão

Os sítios de monitoramento em Portachuelo apresentam no período de 16 junho de 2011 a 15 de junho de 2012 os regimes diários de temperatura do solo de dias de congelamento e descongelamento (DCD) e dias de descongelamento (DD). A alternância dos regimes diários em cada sítio está associada a sazonalidade da precipitação e microclima. A maior frequência de DCD ocorre no período seco, nos meses de julho a agosto de 2011 e junho de 2012. No restante do período analisado ocorre aumento de DD.

No Roquedal predominam DCD em todos os meses e no Pajonal e Bosque de Polylepsis nos meses do período seco. A maior frequência de DD ocorre no Bosque de Polylepsis.

Permafrost ou regime de dias de congelamento não foram observados nos sítios. No entanto, a presença de solifluxão, típica de ambiente periglacial, ocorre no solo do Roquedal em alguns dias DCD com maior umidade. Feições de crioturbação também foram observados em solos acima de 4.700 metros de altitude nos Andes tropicais.

A série temporal de um ano desta pesquisa limita análises conclusivas do comportamento da temperatura do solo entre as estações secas e úmidas devido os efeitos de alternância de El Niño e La Niña. Além disto, apenas um ano de dados não permite interpretações sobre tendências de aquecimento ou resfriamento. Independente disto, os resultados aqui apresentados são relevantes porque podem ser referência para futuras interpretações com uma série temporal maior.

7. Referências bibliográficas

- Cano, A., La Torre, M. I., Monsalve, C., Roque, J., Mendoza, W., Salinas, I., Castillo, S., Aponte, H., 2005. **Las plantas comunes de san marcos (Huari, Ancash) – Guía de campo**. Serie de divulgación n° 12, Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Museo de Historia Natural.
- Cano, A., Mendoza, W., Castillo, S., Morales, M., La Torre, M. I., Aponte, H., Delgado, A., Valencia, N., Vega, N. Flora y vegetación de suelos crioturbados y hábitats asociados em la Cordillera Blanca, Ancash, Perú. **Rev. Peru. Biol.** 17(1) 95-103, 2010.
- Cuesta, F., Peralvo, M., Valarezo, V. **Los bosques montanos de los Andes Tropicales: Una evaluación regional de su estado de conservación y de su vulnerabilidad a efectos del cambio climático**. Serie Investigación y Sistematización N°5. Programa Regional ECOBONA-INTERCOOPERATION. Quito. 73 pp., 1990.
- FAO, 2006. **Guidelines for soil description**. Fourth edition. Rome.
- Francou, B., Le Méhauté, N., Jomelli, V. Factors controlling spacing distances of sorted stripes in a low-latitude, Alpine environment (Cordillera Real, 16S, Bolivia). **Permafrost. Periglac. Process.** 12 (4), 367– 377, 2001.
- French, H. **The Periglacial Environment**. Longman, Harlow. 341 pp., 1996.
- Gilichinsky, D. A., Barry, R. G., Bykhovets, S. S. A century of temperature observations of soil climate: methods of analysis and long-term trends. In: A.G. Lewkowicz and M. Allard (eds.) Permafrost. Proc. 7th Intl Conf. **Yeloowknife, Canada**, Université Laval, Centre d'Etudes Nordiques, pp. 313-317, 1998.
- Guglielmin, M., Evans, C.J.E., Cannone, N. Active layer thermal regime under different vegetation conditions in permafrost areas. A case study at Signy Island (Maritime Antarctica). **Geoderma** 144, 73–85, 2008.
- Hastenrath, S. Observations on soil frost phenomena in the Peruvian Andes. **Z. Geomorphol.** N.F. 21 (3), 357–362, 1977.

- Hellström, R. A., Higgins, A., Ferris, D., Mark, B., Levia, D. Impacts of complex terrain on evapotranspiration within a tropical alpine valley in the Peruvian Andes. 67th **Eastern Snow Conference**, Jiminy Peak Mountain Resort, Hancock, MA, USA, 2010.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). **Huascarán. Generalidades y Diagnóstico**. Unidad Agrária Departamenta V, Ancash, Dirección de Parques Nacionales, Programa de Desarrollo Forestal, 1990.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). **Plan Maestro del Parque Nacional Huascarán 2003 – 2007**, 2003.
- Kaser, G., Ames, A., Zamora, M. Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru. *International Glaciological Society. Annals of Glaciology* 14, 136-140, 1990.
- Kaser, G., Georges, C., Ames, A. Modern glacier fluctuations in the Huascarán–Chopicalqui-Massif of the Cordillera Blanca, Peru. **Zeitschrift fuer Gletscherkunde und Glazialgeologie** 32, 91–99, 1996.
- Mark, B. Tracing tropical Andean glaciers over space and time: Some lessons and transdisciplinary implications. **Global and Planetary Change** 60, 101-114, 2008.
- Pérez, F.L. Le transport des cailloux par la glace d'exsudation dans les Hautes Andes (Venezuela). **Rev. Geomorphol. Dyn.** 36 (2), 33–51, 1987.
- Petford, N. Artherton, M.P. Halliday, A.N. Rapid magma production rates, underplating and remelting in the Andes: isotopic evidence from northern-central Peru (9-11°S). **Journal South America Earth Science** 9, 69-78, 1996.
- Raup, B., Racoviteanu, A., Khalsa, S.J.S., Helm, C., Armstrong, R., Arnaud, Y. The GLIMS geospatial glacier database: a new tool for studying glacier change. **Global and Planetary Change** 56 (1–2), 101–110, 2006.
- Sarmiento, G. Los principales gradientes ecoclimáticos en los Andes tropicales. Bogotá, Colombia. In: Congreso Latinoamericano de Botánica, 4; **Simposio de Ecología de tierras altas**, Anais, v.1, Medellín, Colombia, 1987.
- Schaetzl, R. J., Anderson, S. **Soils Genesis and Geomorphology**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- Silverio, W. **Atlas del Parque Nacional Huascarán – Cordillera Blanca – Perú**. Lima, p.72, 2003.
- Viera, G. T., Mora, C., Ramos, M. Ground temperature regimes and geomorphological implications in a Mediterranean mountain (Serra da Estrela, Portugal). **Geomorphology** 52, 57-72, 2003.
- Vuille, M., Kaser, G., Juen, I. Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. **Global and Planetary Change** 62, 14-28, 2008.

CAPÍTULO 3

ASSEMBLEIAS MODERNAS DE FITÓLITOS DE ALTA MONTANHA TROPICAL, PUNA PERUANA – CORDILHEIRA BLANCA

Resumo

Este capítulo apresenta a primeira descrição de assembleias de fitólitos de fitofisionomias características da Puna peruana. O objetivo foi identificar espécies de plantas produtoras de fitólitos sobre solos com diferentes regimes de umidade e estabelecer e examinar assembleias modernas de fitólitos para que possam ser usadas como referência em estudos paleoambientais. Foi traçada uma catena na face leste da Cordilheira Blanca (Andes peruanos) e coletadas espécies vasculares nas fitofisionomias Roquedal, Pajonal de Puna e Bosque de Polylepis. Após a identificação, as espécies foram calcinadas e tratadas com 10 mL de solução de HCl 2 mol/L para separação dos fitólitos da cinza. As amostras de fitólitos foram analisadas em microscópio óptico onde foram identificadas as morfologias e realizada a contagem de 300 fitólitos por amostra. A partir destes dados foi calculada a frequência relativa de cada morfotipo. Foram identificadas 13 espécies produtoras de fitólitos, 9 são Poaceae. As Poaceae que ocorrem nas três fitofisionomias, pertencem a sub-família Festucoid (Pooideae - com sistema fotossintético C₃) e produzem fitólitos circulares, retangulares, oblongs, rondels. O gênero *Agrostis* possui fitólitos festucóides diferenciados, sendo maiores e menos espessos. Esta pesquisa conclui que o uso dos fitólitos para distinguir as três fitofisionomias é limitado, uma vez que as assembleias de fitólitos não se diferenciam mesmo ocorrendo em solos com diferentes regimes de umidade.

Palavras chave: Roquedal, Pajonal de Puna, Bosque de Polylepis, Parque Nacional Huascarán.

1. Introdução

Corpos silicosos ou fitólitos de silício são partículas microscópicas formadas no interior ou entre células no tecido de plantas (Piperno e Pearsall, 1998). No processo de biomineralização, as raízes das plantas absorvem sílica solúvel ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) da solução do solo que em seguida é precipitada pela perda de água por transpiração (Rovner, 1971).

Fitólitos podem ter diferentes tamanhos, geralmente entre 20 a 200 μm e formas variadas (Rovner, 1971). Dentre todas as famílias de plantas estudadas, a família das gramíneas (Poaceae) é a maior produtora de fitólitos (Piperno, 1988; Rovner, 1971).

De acordo com Rovner (1971) sub-famílias de Poaceae podem produzir fitólitos com a mesma morfologia. Devido à redundância e a multiplicidade em sua produção não é possível atribuir valor taxonômico a um único fitólito. Por isto, são utilizadas assembleias

de fitólitos que consideram todas as morfologias encontradas e sua abundância com o intuito de identificar grupos diagnósticos, isto é, grupos com significância taxonômica (Gallego e Distel, 2004; ICPN Working group (2005).

Sub-famílias de Poaceae são indicadoras de temperatura e precipitação. A sub-família Pooideae (C₃) é mais abundante em ambientes de clima frio e úmido. Chlorideae são plantas C₄ e ocorrem em ambientes semiáridos e quentes. Panicoideae também são C₄ e ocorrem em ambientes de clima quente, porém com maior disponibilidade de água (Twiss, 1992).

Índices climáticos calculados a partir de assembleias de fitólitos possibilitam indicar a sub-família que a produziu, uma vez que plantas com sistemas fotossintéticos C₃ e C₄ se diferenciam por sua coleção de fitólitos. Isto é a base para seu uso em reconstituição de paleovegetação (Piperno, 1988). O índice Ic ($Ic = Poideae / Pooideae + Chlorideae + Panicoideae$) por exemplo permite diferenciar uma comunidade vegetal estimando a proporção de fitólitos de plantas C₃ e C₄ (Twiss, 1992).

Em estudos paleopedológicos as assembleias de fitólitos são usadas como ferramenta para identificar paleossolos e indicar o tipo de vegetação envolvida em sua gênese (Rovner, 1971). As assembleias modernas de fitótilos são usualmente comparadas com assembleias de fitólitos encontrados em solos enterrados para serem feitas analogias entre ambientes (Cordova et al., 2011; Saijo e Tanaka, 2002; Sedov et al., 2003).

O objetivo desta pesquisa foi identificar espécies de plantas produtoras de fitólitos sobre solos com diferentes regimes de umidade da Cordilheira Blanca (Puna peruana) e estabelecer e examinar assembleias modernas de fitólitos para que possam ser usadas como referência em estudos paleoambientais.

2. Área de estudo

A Cordilheira Blanca localiza-se no norte do Peru, no estado de Ancash (Figura 1). Com extensão latitudinal de 8 a 11° S e longitudinal de 77 a 78° W, é a maior cadeia de montanhas tropical do mundo, com mais de 30 picos acima de 6.000 m de altitude. Desde de 1975 a Cordilheira Blanca é protegida pelo Parque Nacional Huascarán (INRENA, 2003).

A Cordilheira Blanca é composta principalmente por um batólito de granodiorito félsico datado do Plioceno/Mioceno, composto por 69-73% de sílica, com diques de rochas básicas (Petford et al., 1996).

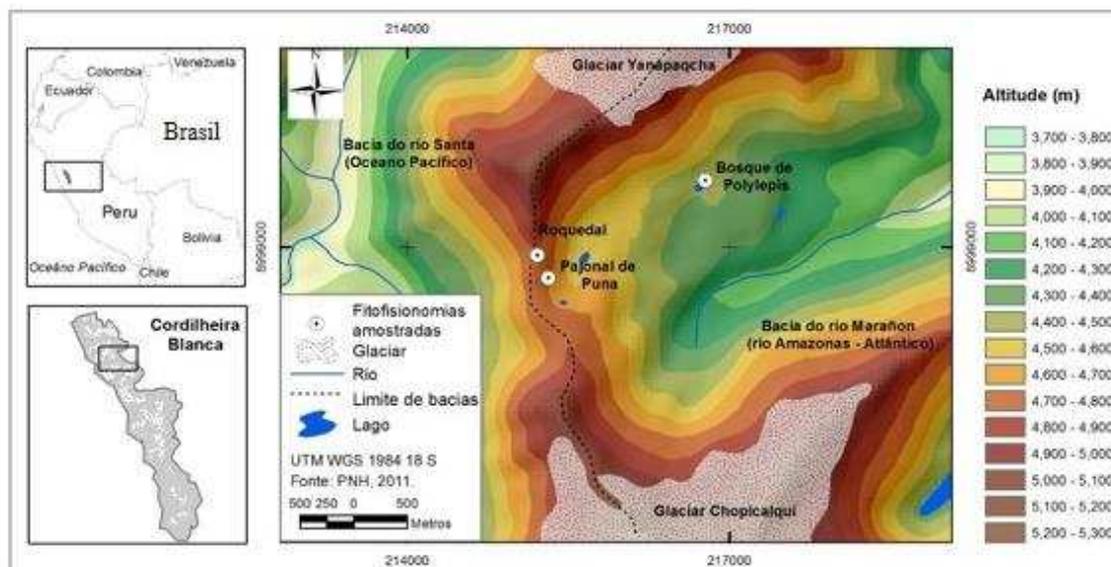


Figura 1. Localização da área de estudo e fitofisionomias amostras

A precipitação média anual nas altas altitudes pode chegar a 1.100 mm e nas baixas elevações a 600 mm (INRENA, 2003). A temperatura média anual é dada por pisos altitudinais de acordo com Silvério (2003): 2.400 – 3.500 = 13 °C; 3.500 – 4.000 = 8 °C e 4.000 – 4.800 = 3 °C. A linha de neve inicia-se a 5.000 m de altitude. O regime é considerado isotérmico, a temperatura não varia ao longo do ano. Porém, existe uma forte variação diária na temperatura, onde os dias são quentes e as noites são frias (INRENA, 2003).

O regime de precipitação é bi-estacional. A estação úmida ocorre entre outubro e abril e a estação seca entre maio a setembro. Devido às massas de ar quente e úmido provenientes da Bacia Amazônica, a face leste da Cordilheira Blanca recebe maior volume de chuvas em relação a face oeste que é afetada por massas de ar frio e seco de anticiclones no oceano Pacífico, formados por influência da Corrente de Humboldt (Kaser et al., 1990).

A Cordilheira Blanca está inserida no ecossistema Puna (INRENA, 1990). Nela podem ser encontradas as principais fitofisionomias da Puna peruana, como o Matorral com vegetação do tipo arbustiva, encontrada em encostas e vales entre 2.400 a 3.800 metros de altitude. O Pajonal é encontrado entre 3.800 a 4.800 metros de altitude e possui plantas gêneros principalmente da família Poaceae, como Calamangrostis e Javara. O Roqedal ocorre entre 4.800 a 5.000 metros de altitude e é composto predominantemente pelas famílias Asteraceae, Poaceae and Brasicaceae (Cano et al., 2005; Cano et al., 2010). O

Bosque de Polylepis, também conhecido como Queñuales, ocorre de forma não contínua entre 3.400 m a 4.800 m de altitude, próximos a cursos de água ou em áreas com muita rochosidade. Predomina a família Rosaceae com espécies arbóreas. A floresta pode ser densa ou esparsa e a altura das árvores pode variar de 6 a 12 metros de altura (Cuesta et al., 2009).

3. Materiais e métodos

3.1. Levantamento florístico

A área selecionada para este estudo foi a face leste ao norte da Cordilheira Blanca, denominada Portachuelo (Figura 1). Foram coletadas amostras de espécies vasculares nas fitofisionomias Roquedal (4.835 m.), Pajonal de Puna (4.705 m.) e Bosque de Polylepis (4.448 m.) (Tabela 1 e Figura 2).

Cada fitofisionomia foi intensamente percorrida para a amostragem das espécies vasculares presentes. Foram coletados 3 exemplares por espécie. A determinação taxonômica (família, sub-família, gênero e espécie) foi feita por meio de chaves e descrições na literatura botânica (Macbride et al., 1936; Tovar, 1993). Cada espécie foi depositada no Herbário San Marcos (USM) do Museo de Historia Natural da Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima – Peru.

Tabela 1. Localização das fitofisionomias e suas características ambientais.

Fitofisionomia ¹	Localização X/Y-UTM 18S	Posição na encosta ²	Elevação m	Orientação °N	Declividade %	Classe de solo ³ (Sistema FAO)
Roquedal	215217/8998923	Summit	4.835	145 - Sudeste	6	Haplic Leptosol (Humic, Dystric, Skeletal)
Pajonal de Puna	215315/8998709	Shoulder	4.705	106 - Leste	61	Haplic Umbrisol (Hyperdystric, Humic, Skeletal)
Bosque de Polylepis	216777/8999676	Back slope	4.448	160 - Sul	23	Folic Umbrisol (Hyperhumic, Orthodystic, Skeletic)

¹Sistema de classificação de acordo com Cano et al. (2005); Cano et al. (2010). ²Posição na encosta por FAO (2006); Ruhe (1960).

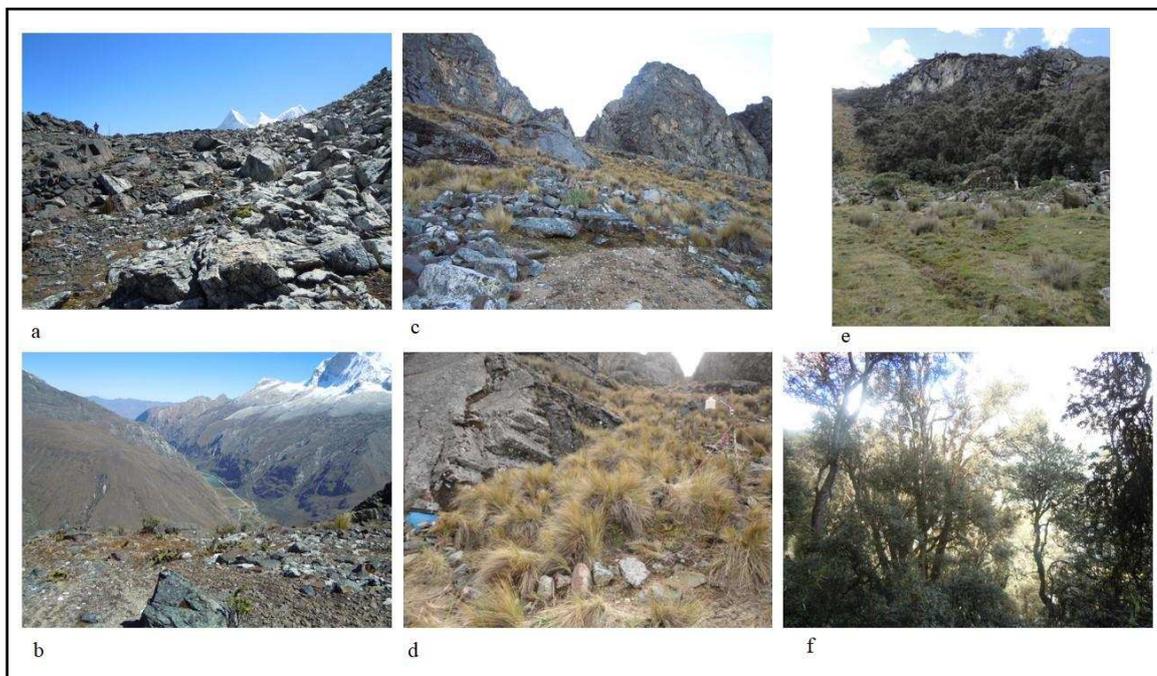


Figura 2. Fitofisionomias amostradas. a) e b) Roquedal; c) e d) Pajonal de Puna; e) e f) Bosque de Polylepis.

3.2. Pré-tratamentos

As amostras das espécies coletadas foram lavadas cuidadosamente com água para remover partículas aderidas à superfície e evitar contaminação com fitólitos do solo. Foram acomodadas em sacos de papel e colocadas em estufa a temperatura de 65 °C por 72 horas. As partes das plantas como galhos, folhas, raízes, flores e inflorescência foram cortadas em pedaços de 2 cm aproximadamente, acomodadas em cadinhos de porcelana e levados para mufla por 5 horas à 550 °C (Costa et al., 2010).

Para separação dos fitólitos da cinza, foram adicionados 10 mL de solução de HCl 2 mol/L para 0,2 g de cinza, onde foram agitados em mesa agitadora à 30 RPM por 1 hora. Posteriormente, centrifugou-se a 1.300 g por 10 min e o sobrenadante foi descartado. Os fitólitos foram lavados com H₂O deionizada por 3 vezes, onde repetiu-se o processo de centrifugação e descarte do sobrenadante.

3.3. Classificação e contagem dos fitólitos

Para classificar e contar os fitólitos de cada espécie, uma pequena quantidade de amostra foi colocada em lâminas de vidro e misturada com óleo de imersão (Bálsamo do Canadá). As observações e a obtenção das microfotografias foram feitas por meio de microscópio óptico com aumento de 400 x com câmera fotográfica acoplada.

Foram contados fitólitos com morfologias conhecidas (fitólitos classificáveis), fitólitos sem morfologia definida (fitólitos não classificáveis) e células de plantas silicificadas (Silica skeletons). Foram quantificados no mínimo 300 corpos silicosos por lâmina/amostra e calculada a porcentagem de cada morfotipo presente. A classificação morfológica foi feita de acordo com Twiss (1969) e International Code for Phytolith Nomenclature 1.0 ICPN Working group (2005).

4. Resultados

4.1. Diversidade florística das fitofisionomias

Foram encontradas no total de 48 espécies de plantas vasculares nas 3 fitofisionomias amostradas (tabela 2). As famílias com maior número de gêneros e espécies são a Asteraceae e a Poaceae.

O Pajonal de Puna é o mais diverso em número de espécies. Foram identificadas 27 espécies das quais 11 são da família Asteraceae e 4 Poaceae. No Roquedal foram identificadas 25 espécies, 11 são da família Asteraceae e 9 da Poaceae. No Bosque de Polylepis foram identificadas 10 espécies, 4 da família Asteraceae e 1 Poaceae.

Tabela 2. Famílias e espécies encontradas em cada fitofisionomia.

Família	Espécie	Roquedal	Pajonal	Bosque de Polylepis
Alstroemeriaceae	Bomarea dulcis (Hook.) Beauverd	x	x	
Alstroemeriaceae	Bomarea involucrosa (Herb.) Baker			x
Asteraceae	Lucilia kunthiana (DC.) Zardini	x	x	
Asteraceae	Senecio macrorrhizus Wedd.		x	
Asteraceae	Senecio sulnicus Cabrera	x	x	
Asteraceae	Xenophyllum marcidum (S.F. Blake) V.A. Funk	x		
Asteraceae	Loricaria ferruginea (Ruiz & Pav.) Wedd.	x	x	
Asteraceae	Belloa piptolepis (Wedd.) Cabrera	x	x	
Asteraceae	Senecio calvus Cuatrec.		x	
Asteraceae	Senecio tephrosioides Turcz.			x
Asteraceae	Senecio culcitioides Sch. Bip.		x	x
Asteraceae	Senecio canescens (Bonpl.) Cuatrec.		x	
Asteraceae	Senecio violifolius Cabrera			x
Asteraceae	Baccharis chilco Kunth		x	
Asteraceae	Gynoxis cf. caracensis			x
Asteraceae	Xenophyllum dactylophyllum (Sch. Bip.) V.A. Funk	x	x	

Continua

Continuação			
Asteraceae	Werneria aretioides Wedd.	x	
Asteraceae	Hypochaeris meyeniana (Walp.) Benth. & Hook. f. ex Griseb.	x	
Asteraceae	Chersodoma ovopedata (Cuatrec.) Cuatrec.	x	
Asteraceae	Senecio adenophyllus Meyen & Walp.	x	x
Asteraceae	Perezia pinnatifida (Bonpl.) Wedd.	x	
Caprifoliaceae	Valeriana grisiana Wedd.		x
Caprifoliaceae	Valeriana sp.	x	
Caryophyllaceae	Stellaria cuspidata Willd. ex Schltld.		x
Caryophyllaceae	Cerastium mucronatum Wedd.	x	x
Ephedraceae	Ephedra americana Humb. & Bonpl. ex Willd.	x	
Ericaceae	Pernettya prostrata (Cav.) DC.	x	x
Fabaceae	Lupinus weberbaueri Ulbr.		x
Gentianaceae	Gentianella weberbaueri (Gilg) Fabris	x	
Grossulariaceae	Ribes weberbaueri Jancz.		x
Juncaceae	Luzula racemosa Desv.	x	x
Malvaceae	Nototriche obtusa A.W. Hill	x	
Malvaceae	Nototriche coccinea A.W. Hill	x	
Orobanchaceae	Bartsia patens Benth.	x	x
Poaceae	Agrostis toluensis Kunth	x	x
Poaceae	Calamagrostis rigida (Kunth) Trin. ex Steud.	x	x
Poaceae	Calamagrostis tarmensis Pilg.		x
Poaceae	Calamagrostis macrophylla (Pilg.) Pilg.	x	x
Poaceae	Festuca weberbaueri Pilg.		x
Poaceae	Agrostis haenkeana Hitchc.		x
Poaceae	Dielsiochloa floribunda (Pilg.) Pilg.	x	x
Poaceae	Calamagrostis heterophylla (Wedd.) Pilg.		x
Polygonaceae	Muehlenbeckia vulcanica Meisn.		x
Rosaceae	Lachemilla erodiifolia (Wedd.) Rothm.		x
Rosaceae	Lachemilla aphanoides (Mutis ex L. f.) Rothm.		x
Rosaceae	Polylepis weberbaueri Pilg.		x
Rubiaceae	Galium corymbosum Ruiz & Pav.		x
Urticaceae	Urtica urens L.		x

4.2. Assembleias de fitólitos

No total das 48 espécies analisadas, 13 produzem fitólitos com e sem morfologia definida. A quantidade de fitólitos classificáveis e não classificáveis varia entre espécies, de 35 a 90% (Figuras 9, 10 e 11).

São 9 espécies da família Poaceae, 1 Orobanchaceae, 1 Urticaceae, 1 Rubiaceae e 1 Rosaceae. As espécies de Poaceae ocorrem nas três fitofisionomias estudadas (Tabela 2). Estas espécies pertencem a sub-família Festicoid (Pooideae) e produzem muitos fitólitos circular, retangular, oblong, rondel (Figuras 3, 9, 10 e 11).

O gênero *Agrostis* ocorre somente no Roquedal e Pajonal de Puna e possui morfotipos festucóides compridos e menos espessos, diferentes daqueles encontrados em outras espécies de Poaceae (Figura 3 – **n, o, p**). *Agrostis toluensis* e *Agrostis haenkeana* possuem respectivamente 2,41% e 3,57% destes morfotipos do total de fitólitos para cada espécie. Fitólitos do tipo polylobate, elongate e ruminante ocorrem em todas as fitofisionomias. Os fitólitos echinate e papilate ocorrem apenas no Pajonal de Puna, porém em pouca quantidade com apenas 0,28% e 0,56% respectivamente (Figuras 4, 5, 6, 9, 10, 11).

Células de epiderme silicificadas ocorrem na maioria das Poaceae. A espécie *Urtica urens* que ocorre somente no Bosque de Polylepis possui morfotipo diferenciado (Figura 7, **j e l**). Espécies de diferentes famílias produzem tricomas variados, são elas a *Bartsia patens*, *Calamagrostis rigida*, *Calamagrostis tarmensis*, *Calamagrostis macrophylla*, *Festuca weberbaueri*, *Urtica urens*, *Galium corymbosum*, *Lachemilla aphanoides*, *Calamagrostis heterophylla* e *Urtica urens*. (Figura 7).

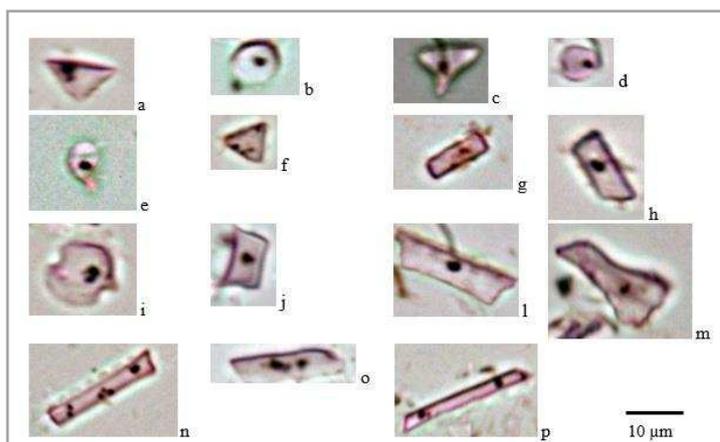


Figura 3. Microfotografias de fitólitos do tipo festucóide (Twiss et al., 1969). **a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, l, m**, identificadas em todas as espécies da família Poaceae. **n, o, p** identificadas apenas na *Agrostis toluensis* e *Agrostis haenkeana*.

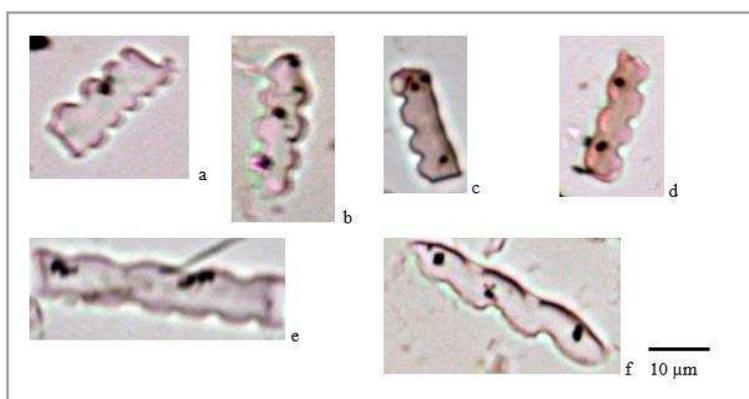


Figura 4. Microfotografias de fitólitos polylobate

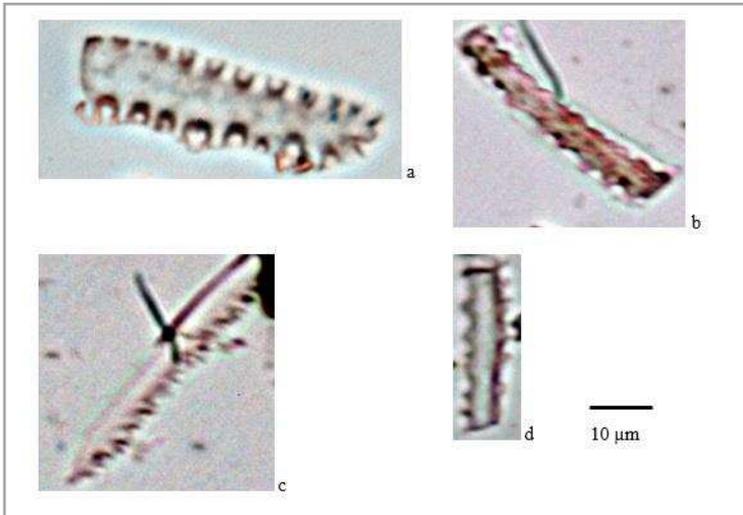


Figura 5. Microfotografias de fitólitos **a** papilate, **b** crenate, **c** ruminated, **d** echinate.

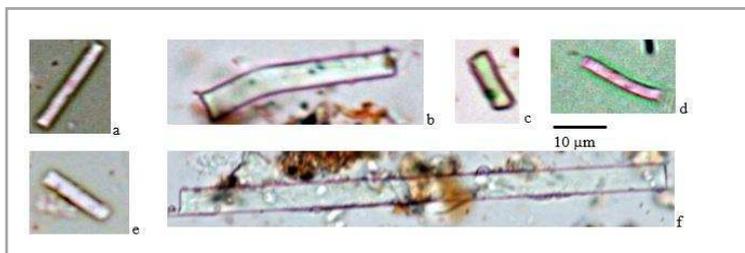


Figura 6. Microfotografias de fitólitos elongate.

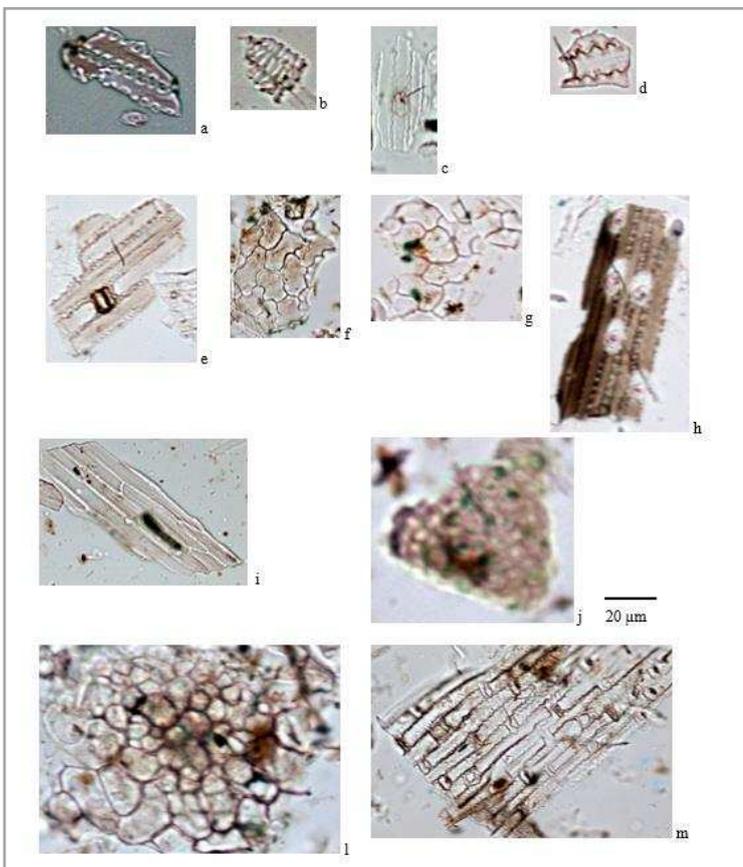


Figura 7. Microfotografias de epidermal cells. **a, b, c, d, e, f, g, h, i, m** identificadas nas espécies da família Poaceae. **j, l** identificadas apenas na *Urtica urens*.

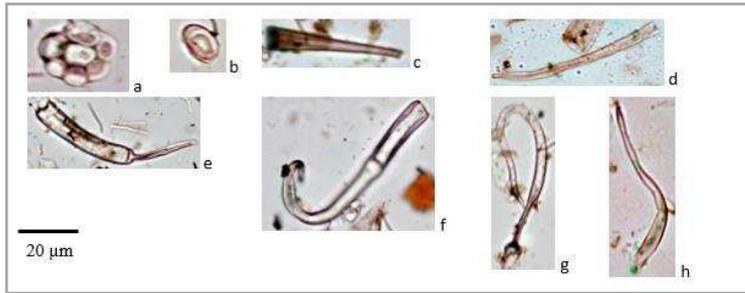


Figura 8. Microfotografias de fitólitos. **a** hair base identificadas na *Lachemilla aphanoides* e *Lachemilla aphanoides*. **b** stomate identificados *Calamagrostis heterophylla*, *Lachemilla aphanoides* e *Bartsia patens*. **c** e **d** hair cell mesophyll identificadas na *Bartsia patens*, *Calamagrostis rigida*, *Calamagrostis tarmensis*, *Calamagrostis macrophylla*, *Festuca weberbaueri*, *Urtica urens*, *Galium corymbosum*, *Lachemilla aphanoides*, *Calamagrostis heterophylla*. **e** e **f** identificadas na *Urtica urens*. **g** e **h** hair cell mesophyll identificadas na *Lachemilla aphanoides*.

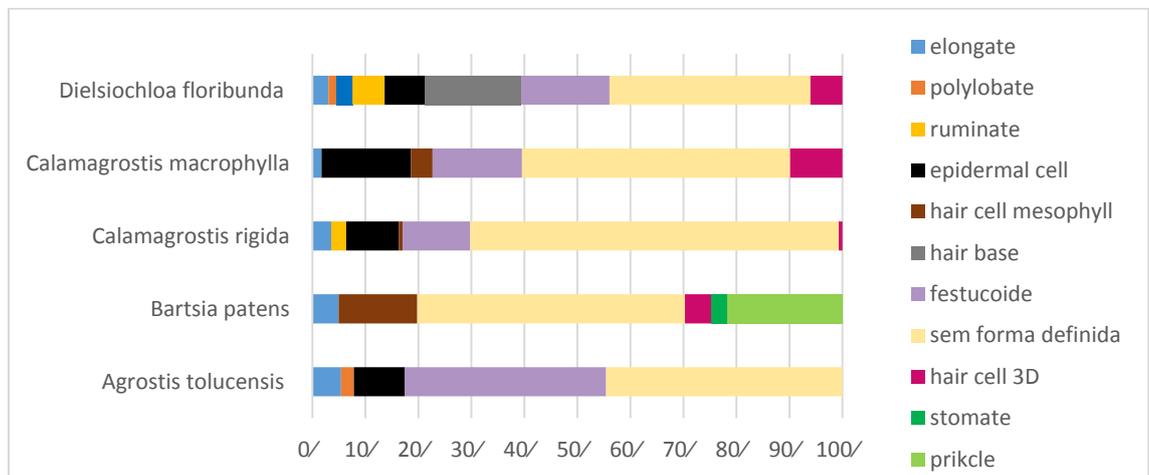


Figura 9. Assembleia de fitólitos do Roquedal. Abundância em %.

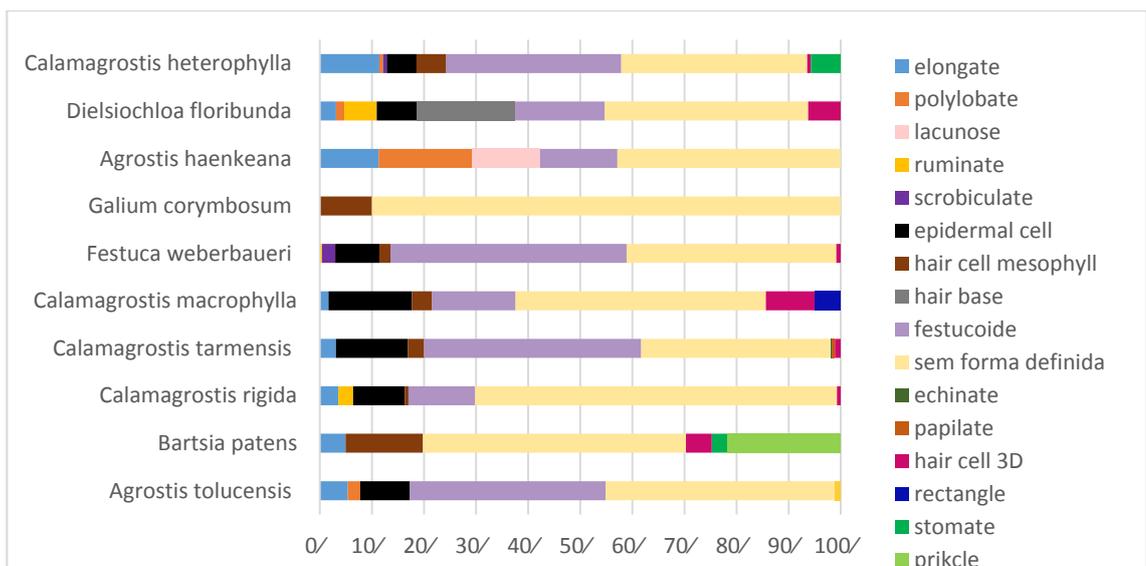


Figura 10. Assembleia de fitólitos do Pajonal de Puna. Abundância em %.

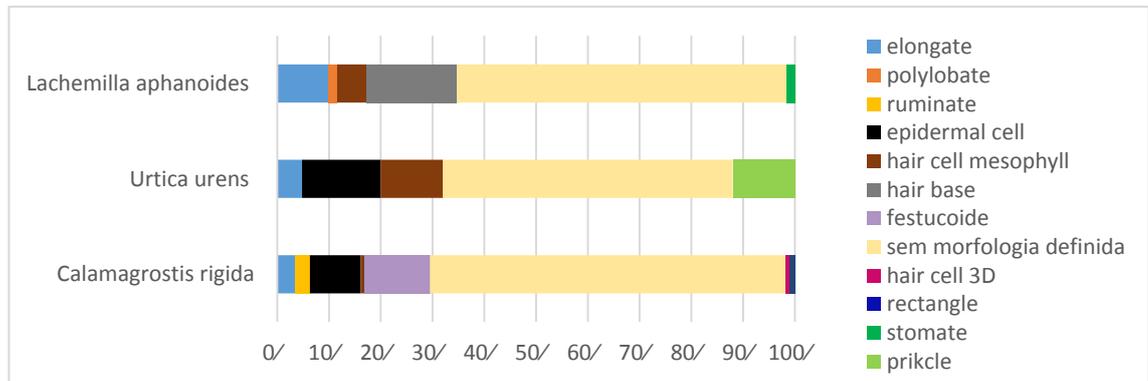


Figura 11. Assembleia de fitólitos do Bosque de Polylepis. Abundância em %.

5. Discussão

Os fitólitos com morfologias circular, retangular, oblong e rondel classificados como festucóide por Twiss et al. (1969) são mais associados a sub-família Pooideae por ocorrerem em grandes quantidades. Estes morfotipos, porém, podem ser encontrados também na epiderme de outras sub-famílias de Poaceae como Arundinoideae, Panicoideae e inflorescências de Bambusoideae (Brown, 1984; Mulholland, 1989; Piperno e Pearsall, 1998).

Os polylobates encontrados nas assembleias das fitofisionomias estudadas não podem ser considerados diagnósticos para sub-famílias porque são encontrados também em assembleias de Panicoideae (Piperno e Pearsall, 1998).

Tricomas possuem baixa estabilidade nos solos devido à alta superfície específica (Piperno, 1988). Deste modo, o tricoma encontrado apenas na espécie *Lachemilla aphanoides* é limitado para indicar Bosque de Polylepis.

No entanto, os morfotipos encontrados apenas nas espécies do gênero *Agrostis* nas amostras do Roquedal e Pajonal de Puna sugere que possam ser utilizados para distinguir Bosque de Polylepis, uma vez que este gênero é ausente na fitofisionomia. Porém, os morfotipos não podem ser utilizados como diagnósticos de gênero porque não foram encontrados em outros estudos com fitólitos de *Agrostis* (Barboni e Bremond, 2009; McCune e Pellatt 2013).

6. Conclusão

As assembleias modernas de fitólitos da Puna peruana da Cordilheira Blanca apresentaram limitações para seu uso em estudos paleoambientais, uma vez que elas não se diferenciam mesmo ocorrendo em solos com diferentes regimes de umidade. Portanto, é necessário ter cautela para usar assembleias de fitólitos para reconstruir condições paleoambientais desta área.

No entanto, estudos analisando fitólitos em solos sob Pajonal de Puna e Roquedal poderiam averiguar se os morfotipos do gênero *Agrostis* encontrados apenas nestas fitofisionomias são estáveis no solo para indicá-las. Assim, seria possível diferenciar estas duas fitofisionomias de Bosque de *Polylepis*.

7. Referências bibliográficas

- Alexandre, A., Meunier, J. D., Lézine, A. M., Vicens, A., Schwartz, D. Phytoliths: indicators of grassland dynamics during the late Holocene in intertropical Africa. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 136, 213 – 229, 1997.
- Barboni, D., Bremond, L. Phytoliths of East African grasses: An assessment of their environmental and taxonomic significance based on floristic data. **Review of Paleobotany and Palynology** 158, 29-41, 2009
- Cano, A. La Torre, M. I., Monsalve, C., Roque, J. Mendoza, W., Salinas, I., Castillo, S., Aponte, H. **Las plantas comunes de san marcos (Huari, Ancash) – Guía de campo**. Serie de divulgación n° 12, Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Museo de Historia Natural, 2005.
- Cano, A., Mendoza, W., Castillo, S., Morales, M., La Torre, M. I., Aponte, H., Delgado, A. Valencia, N., Vega, N. Flora y vegetación de suelos crioturbados y hábitats asociados em la Cordillera Blanca, Ancash, Perú. **Rev. Peru. Biol.** 17(1) 95-103, 2010.
- Cordova, C. E., Johnson, W. C., Mandel, R. D., Palmer, M. W. Late Quaternary environmental change inferred from phytoliths and other soil-related proxies: Case studies from the central and southern Great Plains, USA. **Catena** 85, 87-108, 2011.
- Costa, L. M., Moreau, A. M. S. S., Moreau, M. S. Estabilidade da sílica biogênica extraída de capim Jaraguá (*Hyparrhenia rufa*) em solução de NaOH. **Quím. Nova**. Vol. 33, n. 8, 1658-1663, 2010.
- Cuesta, F., Peralvo, M., Valarezo, V. **Los bosques montanos de los Andes Tropicales: Una evaluación regional de su estado de conservación y de su vulnerabilidad a efectos del cambio climático**. Serie Investigación y Sistematización N°5. Programa Regional ECOBONA-INTERCOOPERATION. Quito. 73 pp., 2009.
- Eash, N. S., Sandor, J. A. Soil chronosequence and geomorphology in a arid valley in the Andes of southern Peru. **Geoderma** 65, 59-79., 1995.
- Gallego, L., Distel, R. A. Phytolith assemblages in Grasses Native to Central Argentina. **Annals of Botany** 94, 865-874, 2004.

- ICPN Working group. Madella, M.; Alexandre, A.; Ball, T. International Code for Phytolith Nomenclature 1.0. **Annals of Botany** 96, 253-260. 2005.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). **Huascarán. Generalidades y Diagnóstico**. Unidad Agraria Departamental V, Ancash, Dirección de Parques Nacionales, Programa de Desarrollo Forestal, 1990.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). **Plan Maestro del Parque Nacional Huascarán 2003 – 2007**, 2003.
- Kaser, G., Ames, A., Zamora, M. Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru. International Glaciological Society. **Annals of Glaciology** 14, 136-140, 1990.
- Macbride et al. **Flora of Peru**. Field Museum of Natural History, Botanical Series, Chicago, 1936.
- McCune, J. L., Pellatt, M. G. Phytoliths of Southeastern Vancouver Island, Canada, and their potential use to reconstruct shifting boundaries between Douglas forest and savannah. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 383–384, 59–71, 2013.
- Miller, D. C., Birkeland, P. W. Soil catena variation along an alpine climatic transect, northern Peruvian Andes. **Geoderma**, 55: 211-223, 1992.
- Miller, D. C., Birkeland, P. W., Rodbell, D. T. Evidence for Holocene stability of steep slopes, Northern Peruvian Andes, based on soils and radiocarbon dates. **Catena** 20, 1-12, 1993.
- Petford, N. Artherton, M. P. Halliday, A. N. Rapid magma production rates, underplating and remelting in the Andes: isotopic evidence from northern-central Peru (9-11°S). **Journal South America Earth Science** 9, 69-78, 1996.
- Piperno, D.R. **Phytolith Analysis: An Archaeological and Geological Perspective**. Academic Press, New York, 1988.
- Piperno, D. R. e Pearsall, D. M. **The silica bodies of Tropical American grasses: Morphology, Taxonomy, and implications for grass systematics and fossil phytolith identification**. Smithsonian Institution Press, Washington, D.C. Contributions to botany 85, 1998.
- Retallack, G. J. **Soils of the past. An introduction to paleopedology**. Second edition, University of Oregon, USA, 2001.
- Rovner, I. Potential of opal phytoliths for use in paleoecological reconstruction. **Quaternary research** 1, 343-359, 1971.
- Ruhe, R. V. Elements of the soil landscape. Trans. **7th Intl Congr. Soil Sci.** (Madison, WI) 4, 165-170, 1960.
- Saijo, K., Tanaka, S. Paleosols of middle Holocene age in the Thakkhola basin, central Nepal, and their paleoclimatic significance. **Journal of Asian Earth Sciences** 21, 323-329, 2002.
- Sedov, S. Rebolledo, E. S., Puente, P. M., Herreña, A. A., Gomez, E. V., Castañeda, C. J. Mineral and organic components of the buried paleosols of the Nevado de Toluca, Central Mexico as indicators of paleoenvironments and soil evolution. **Quaternary International** 106-107, 169-184, 2003.
- Silverio, W. **Atlas del Parque Nacional Huascarán – Cordillera Blanca – Perú**. Lima, p.72, 2003.

Tovar, O. **Las Gramineas (Poaceae) del Perú**. Ruizia 13, Madrid, 1993.

Twiss, P.C., Suess, E., Smith, R.M. Morphological classification of grass phytoliths. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 33, 109-115, 1969.

Twiss, C. Predicted world distribution of C₃ e C₄ grass phytoliths. In: **Phytolith Systematics. Advances in Archaeological and Muesum Science**, volume 1, 1992.

CONCLUSÃO GERAL

Os pedons analisados ao longo do gradiente climático (oeste-Llanganuco e leste-Portachuelo) na região norte da Cordilheira Blanca são fracamente desenvolvidos, com sequência de horizontes A enterrados e ausência de horizontes B. Apresentam os mesmos processos de formação de solos associados à acumulação de matéria orgânica, como humificação, melanização e formação de complexos organometálicos. A maior parte dos pedons (70%) foram classificados como Umbrisols.

A instabilidade do ambiente favorece os processos de erosão e sedimentação em detrimento aos processos pedológicos e não permite tempo suficiente para maior desenvolvimento dos solos. Possivelmente esta característica faz com que os solos aqui estudados são menos desenvolvidos em relação aos outros solos encontrados nos Andes peruanos.

No entanto, foi observada diferença na intensidade de intemperismo entre os pedons da fachada oeste e leste. Alguns pedons na fachada leste, mais úmida, apresentaram maior intensidade de intemperismo químico com formação de óxidos de ferro e minerais secundários, sugerindo que além do microclima e material de origem, o clima regional também controla a intensidade do intemperismo nesta região.

Os pedons de Portachuelo apresentaram dois regimes diários da temperatura do solo no período entre junho de 2011 a junho de 2012: Dias de congelamento e descongelamento (DCD) e dias de descongelamento. Não foram observados regimes de congelamento em nenhuma profundidade que poderia indicar presença de permafrost.

O regime DCD ocorre com maior frequência na estação seca. Em contrapartida o regime DD aumenta sua frequência no período úmido. Além de variar devido a sazonalidade, o microclima de cada fitofisionomia controla a alternância dos regimes. DCD predomina no Roquedal em todos os meses do ano enquanto no Pajonal e Bosque de Polylepis o predomínio ocorre no período seco.

A presença de solifluxão, típica de uma ambiente periglacial foi observada no solo do Roquedal em alguns dias DCD com maior umidade. Feições de crioturbação também foram observados em solos acima de 4.700 metros de altitude nos Andes tropicais.

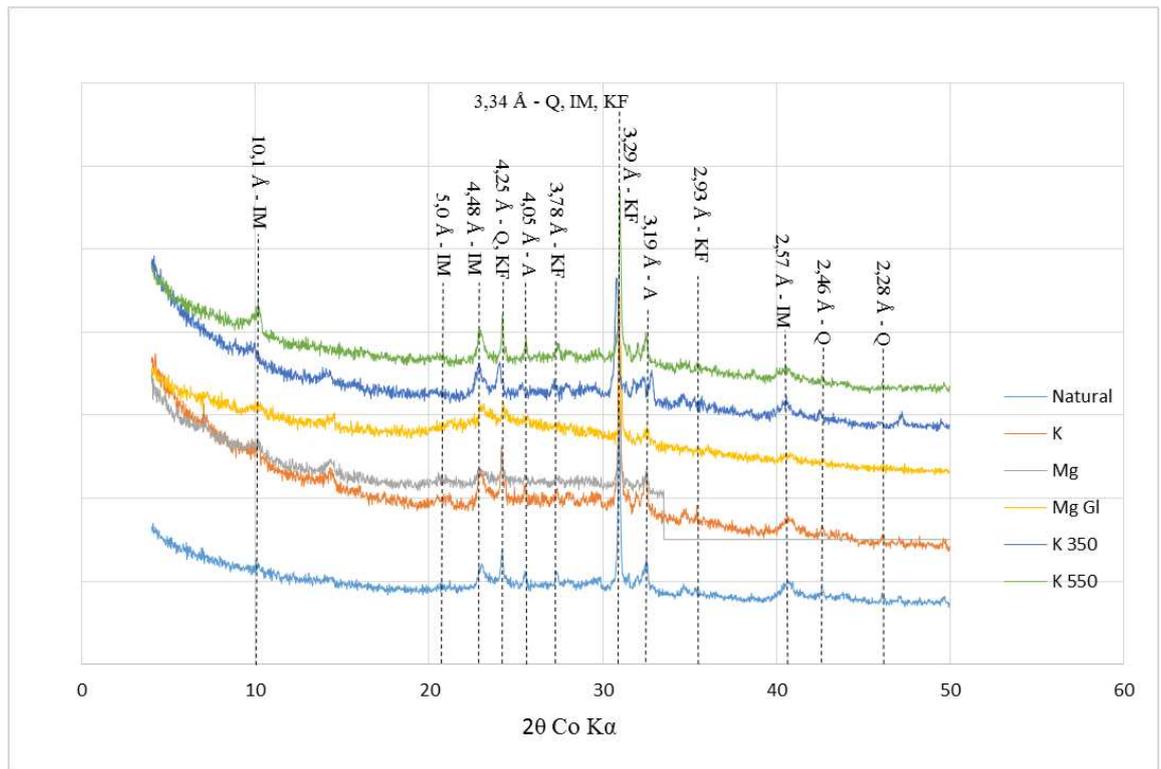
A continuação do monitoramento nos três sítios permitirá analisar uma série temporal maior de dados para análises mais conclusivas do comportamento térmico e hídrico destes solos e avaliar tendências de mudanças climáticas.

As assembleias modernas de fitólitos da Puna peruana da Cordilheira Blanca apresentaram limitações para seu uso em estudos paleoambientais, uma vez que elas não se

diferenciam mesmo ocorrendo em solos com diferentes regimes de umidade. Portanto, é necessário ter cautela para usar assembleias de fitólitos para reconstruir condições paleoambientais desta área.

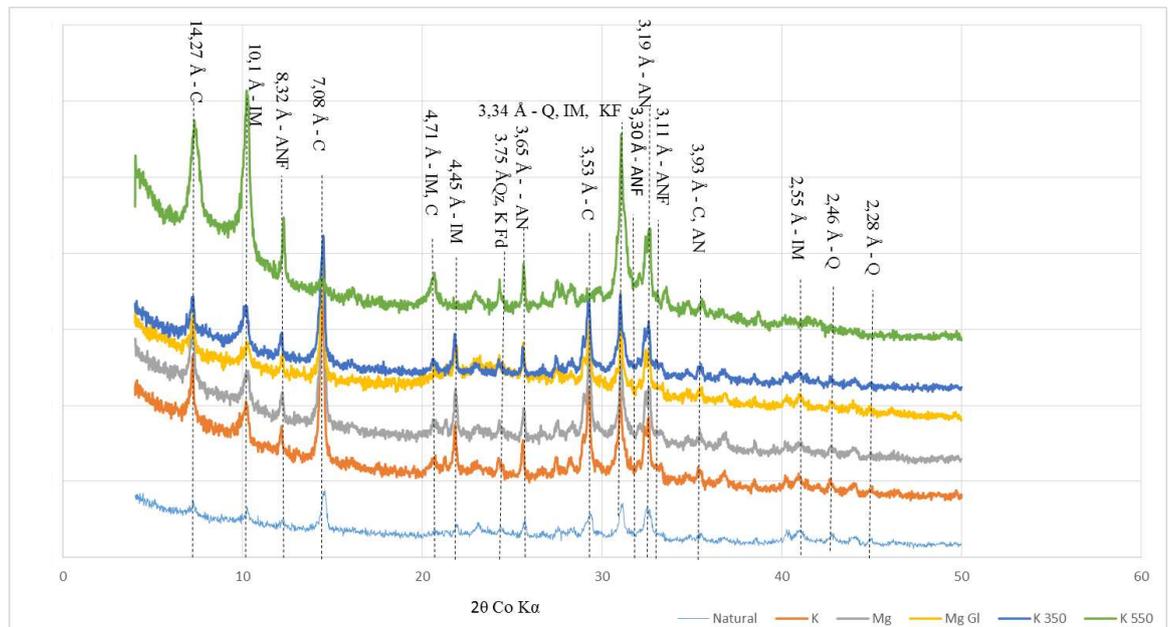
No entanto, estudos analisando fitólitos em solos sob Pajonal de Puna e Roquedal poderiam averiguar se os morfotipos do gênero *Agrostis* encontrados apenas nestas fitofisionomias são estáveis no solo para indicá-las. Assim, seria possível diferenciar estas duas fitofisionomias de Bosque de *Polylepis*.

ANEXO A – Difratomia de raio-x



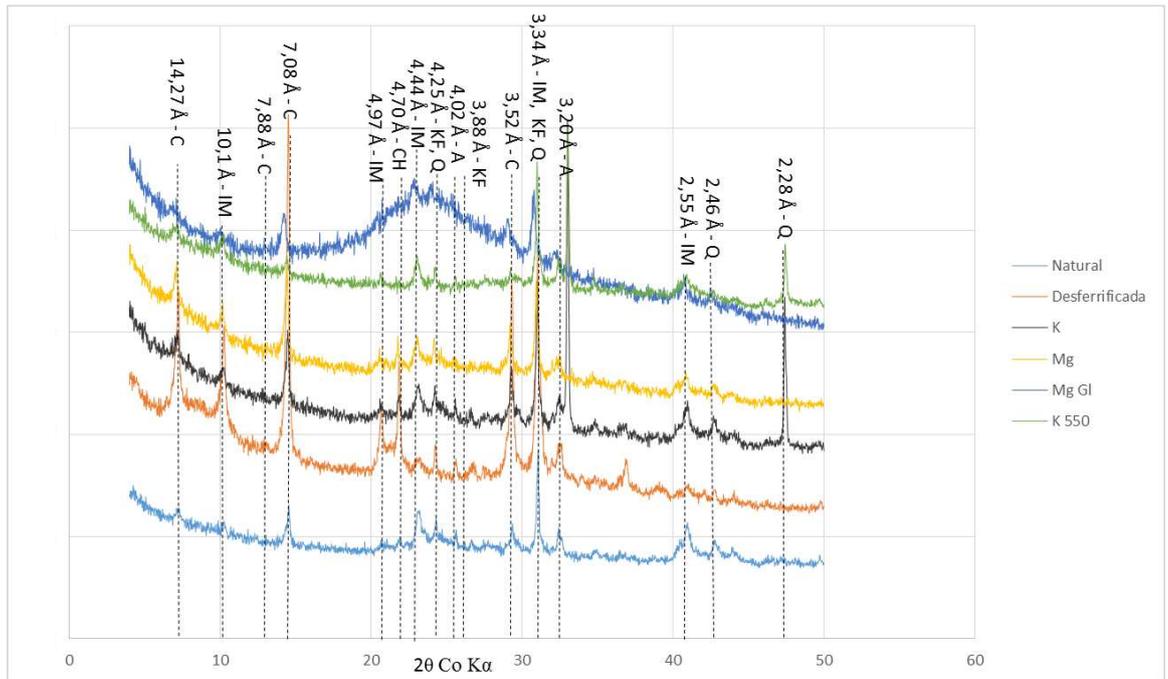
Q= Quartzo, A= Albita, KF= Feldspato potássico, IM= Ilita-Mica. K= Saturação por K, Mg= Saturação por Mg, Mg= Solvatação por Mg glicerol, K 350= Saturação por K e aquecimento a 350 °C, K 550= Saturação por K e aquecimento a 550 °C.

Figura 1- Difratomia de raio-x da fração argila natural e com tratamentos do P1 – 2Ahb2.



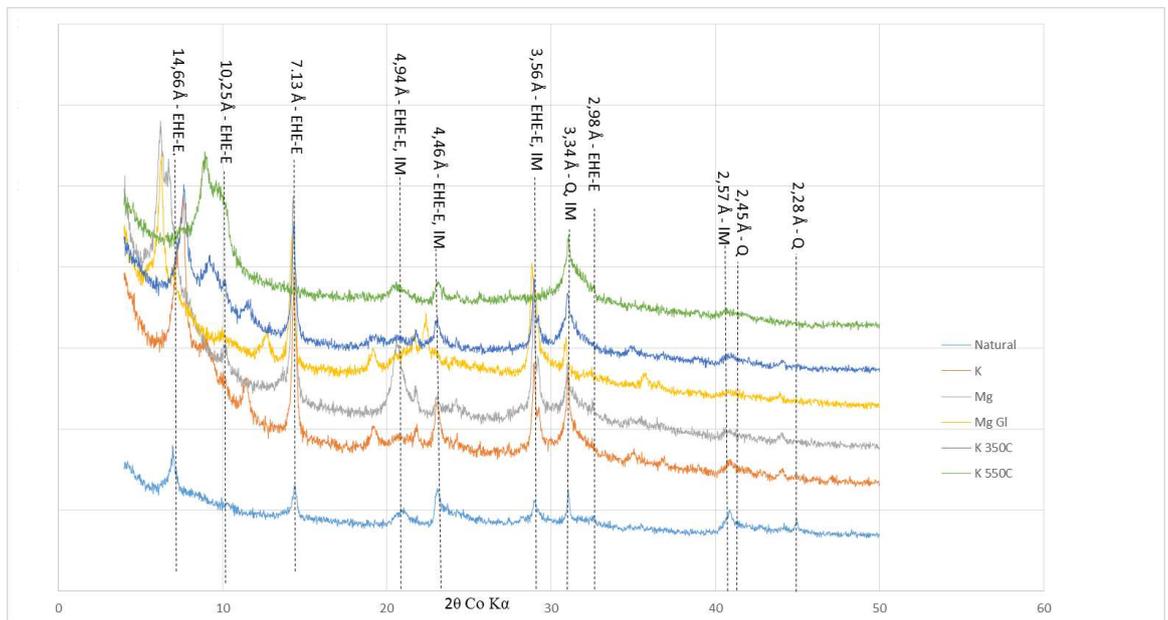
Q= Quartzo, KF= Feldspato potássico, IM= Ilita-Mica, AN= Anortita, ANF= Anfibólio, C= Clorita. K= Saturação por K, Mg= Saturação por Mg, Mg= Solvatação por Mg glicerol, K 350= Saturação por K e aquecimento a 350 °C, K 550= Saturação por K e aquecimento a 550 °C.

Figura 2- Difratomia de raio-x da fração argila natural e com tratamentos do P6 – 3Ahb2.



Q= Quartzo, KF= Feldspato potássico, IM= Ilita-Mica, A= Albita, C= Clorita. K= Saturação por K, Mg= Saturação por Mg, Mg= Solvatação por Mg glicerol, K 350= Saturação por K e aquecimento a 350 °C, K 550= Saturação por K e aquecimento a 550 °C.

Figura 3- Difratometria de raio-x da fração argila natural e com tratamentos do P7 – 3Ahb1.



Q= Quartzo, IM= Ilita-Mica, EHE-E= EHE-Esmectita, K= Saturação por K, Mg= Saturação por Mg, Mg= Solvatação por Mg glicerol, K 350= Saturação por K e aquecimento a 350 °C, K 550= Saturação por K e aquecimento a 550 °C.

Figura 4- Difratometria de raio-x da fração argila natural e com tratamentos do P10 – 3Ahb2.

ANEXO B - Análise elementar do material de origem

Tabela 1. Análise elementar do material de origem dos solos.

Rocha	SiO₂	TiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MnO	MgO	CaO	Na₂O	K₂O	LOI	Soma
Granodiorito	74.11	0.11	14.36	0.90	0.12	0.24	1.24	4.44	3.42	0.47	99.41
Biotita-tonalita	69.58	0.97	16.04	5.73	0.07	1.23	0.27	0.47	1.89	2.43	98.97
Diorito	50.65	1.31	20.24	8.82	0.13	3.73	5.60	4.12	1.93	2.48	99.45

LOI= Loss on ignition