

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Antrossolos de *terrazas* no Deserto do Atacama: caracterização e uso de um
patrimônio material e cultural andino**

Fabricio Morais Rosa
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

FABRICIO MORAIS ROSA

Antrossolos de *terrazas* no Deserto do Atacama: caracterização e uso de um patrimônio material e cultural andino

Dissertação 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 *Magister Scientiae*.

Orientador: Carlos E. G. R. Schaefer

Coorientador: Davi Feital Gjorup

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

T

R788a
2025 Rosa, Fabricio Morais, 1996-
Antrossolos de *terrazas* no Deserto do Atacama:
caracterização e uso de um patrimônio material e cultural andino
/ Fabricio Morais Rosa. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (94 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.529>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Agricultura tradicional - Atacama, Deserto (América do Sul). 2. Conhecimento tradicional associado - Atacama, Deserto (América do Sul) . 3. Mudanças climáticas. I. Schaefer, Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud, 1965-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 630.98

FABRICIO MORAIS ROSA

Antrossolos de *terrazas* no Deserto do Atacama: caracterização e uso de um patrimônio material e cultural andino

Dissertação 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 *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de maio de 2025.

Assentimento:

Fabricio Moraes Rosa
Autor

Carlos Ernesto Goncalves Reynaud Schaefer
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 19/08/2025 às 09:33:08 e pelo orientador em 25/08/2025 às 10:40:41. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **VB5U.LRH8.GFMX** e clique no botão 'Validar documento'.

Dedico esta conquista às pessoas que foram meu chão e meu refúgio.

À minha mãe, Cidinha, que com sua força e amor infinitos me ensinou a nunca desistir. Sua torcida silenciosa foi a energia que me moveu.

Ao meu tio Tomás, por sua presença amiga e por cada palavra de incentivo que me deu segurança para continuar.

Aos meus amigos, que souberam transformar cansaço em risada e ansiedade em esperança. Vocês foram a pausa necessária e o ombro amigo em todos os momentos.

Este trabalho é meu, mas a força para realizá-lo veio de vocês.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é resultado de uma pesquisa desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, sob a orientação do Prof. Dr. Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer e coorientação do Prof. Dr. Davi Feital Gjørup. Contou, ainda, com a colaboração da Profa. Dra. Maria Alice Fernandes Corrêa Mendonça, do Departamento de Economia Rural da UFV, e do Prof. Dr. Bruno Nery Fernandes Vasconcelos do Departamento de Solos.

O trabalho está estruturado em dois capítulos principais, que abordam os Anthrosols do Deserto do Atacama, com ênfase na caracterização dos solos tradicionalmente cultivados e na investigação das práticas de manejo da água e do solo em um contexto de mudanças climáticas.

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa — desde a elaboração do projeto até a execução em campo e a redação final desta dissertação — os professores colaboradores desempenharam papéis fundamentais em distintas etapas do trabalho. Os professores Davi Feital Gjørup e Bruno Nery Fernandes Vasconcelos atuaram diretamente nas atividades de campo, com ênfase na coleta de solos, além de contribuírem significativamente nas discussões relacionadas à ciência do solo. O professor Davi teve participação expressiva na concepção e organização do primeiro capítulo. No eixo socioantropológico, a professora Maria Alice Fernandes Corrêa Mendonça orientou a construção do segundo capítulo e prestou suporte técnico e metodológico durante a realização das entrevistas em campo, favorecendo a articulação entre os dados qualitativos e as análises quantitativas desenvolvidas. A realização deste trabalho deve muito de sua essência aos verdadeiros guardiões da terra. Deixo aqui meu sincero e especial agradecimento aos agricultores e agricultoras do Atacama, que não apenas participaram desta pesquisa, mas me abriram as portas de suas comunidades e de suas histórias. Agradeço imensamente pelo tempo dedicado e, sobretudo, pela riqueza das informações compartilhadas, um saber construído através de gerações. Meu reconhecimento se estende também àqueles que serviram como elo, cuja ajuda foi crucial para estabelecer a comunicação e a confiança necessárias para esta troca de conhecimento tão valiosa.

A pesquisa foi realizada com o apoio institucional do Núcleo de Pesquisas dos Ecossistemas Terrestres da Antártica – Terrantar, cujo ambiente interdisciplinar contribuiu de forma significativa para o embasamento teórico e metodológico deste trabalho, especialmente no que se refere ao estudo de ecossistemas em regiões extremas. Este trabalho foi realizado

com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa merece especial reconhecimento pela infraestrutura e suporte técnico disponibilizados, fundamentais para a realização das análises físico-químicas e mineralógicas dos solos.

RESUMO

ROSA, Fabricio Morais, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2025. **Antrossolos de *terrazas* no Deserto do Atacama: caracterização e uso de um patrimônio material e cultural andino**. Orientador: Carlos Ernesto Goncalves Reynaud Schaefer. Coorientador: Davi Feital Gjorup.

Este estudo examina o conhecimento agrícola tradicional e as práticas de manejo do solo das populações indígenas no Deserto do Atacama, com foco nos Lican Antai (Atacameños) e suas técnicas agrícolas sustentáveis, por meio das terrazas (Andenes), em condições áridas extremas. A pesquisa combina os preceitos dos métodos etnopedológicos com a caracterização pedológica para documentar e compreender como as práticas agrícolas ancestrais e atuais, influenciam propriedades químicas, físicas e mineralógicas destes solos, permitindo assim que essas comunidades prosperassem em um dos lugares mais secos da Terra. O primeiro capítulo investiga os Anthrosols do Deserto do Atacama, analisando como as populações tradicionais transformaram os solos através da agricultura ao longo de alguns séculos. Amostras de solo de seis vilarejos foram coletadas e analisadas quanto à granulometria, matéria orgânica, nutrientes, condutividade elétrica e mineralogia. Os resultados revelam três principais processos de antrossolização: a construção das terrazas com materiais selecionados, irrigação com água de degelo andina para suprir a necessidade das plantas sem induzir salinização e a adição de esterco animal, que aumenta significativamente o conteúdo de matéria orgânica dos solos e auxilia na ciclagem de nutrientes. Essas práticas melhoraram a estrutura do solo, a retenção de água e a fertilidade, indicando que o manejo tradicional desses solos desempenha um papel fundamental na agricultura sustentável em ambientes áridos. A análise mineralógica da fração argila destacou a presença de carbonatos secundários em alguns solos cultivados, provavelmente como resultado da irrigação, ilustrando ainda mais o impacto das intervenções humanas nas propriedades do solo. O segundo capítulo foca nos terraços agrícolas mantidos pelos agricultores Lican Antai, documentando suas sofisticadas práticas de manejo da água e do solo. Por meio de entrevistas abertas baseadas nos preceitos etnopedológicos e análise quantitativa do solo, esta pesquisa revela como os sistemas tradicionais de irrigação, regulamentados por autoridades locais como as directivas e o Juez de Agua, foram cruciais para sustentar a produção agrícola. Apesar dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, incluindo a redução da neve e precipitações irregulares, esses sistemas continuam a funcionar com base em séculos de conhecimento

tradicional indígena. Ao debruçar pelas práticas de manejo do solo, mostra-se que as práticas agrícolas tradicionais, como rotação de culturas, pousio sazonal e fertilização orgânica, melhoram a fertilidade do solo e promovem a saúde a longo prazo, com maiores teores de matéria orgânica, pH e condutividade elétrica estáveis. O estudo também enfatiza as dimensões espirituais e culturais do manejo agrícola, com o culto à deusa Pachamama, que representa o ambiente, e rituais como a limpeza de canais, refletindo uma profunda conexão entre a cosmovisão Lican Antai e suas práticas agrícolas. Essa dissertação destaca a relação intrincada entre o conhecimento tradicional, o manejo sustentável do solo e da água e a resiliência dessas comunidades diante das mudanças climáticas.

Palavras-chave: manejo ancestral; agricultura; conhecimento indígena; Inca; antrossolização; salinização; matéria orgânica

ABSTRACT

ROSA, Fabricio Morais, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2025. **Anthrosols of terrazas in the Atacama Desert: characterization and use of an Andean material and cultural heritage.** Adviser: Carlos Ernesto Goncalves Reynaud Schaefer. Co-adviser: Davi Feital Gjorup.

This study examines the traditional agricultural knowledge and soil management practices of Indigenous populations in the Atacama Desert, with a specific focus on the Lican Antai (Atacameños) and their sustainable agricultural techniques, such as the use of agricultural terraces (Andenes), under extreme arid conditions. The research integrates ethnopedological methods with pedological characterization to document and comprehend how ancestral and contemporary agricultural practices influence the chemical, physical, and mineralogical properties of these soils, thereby enabling these communities to thrive in one of the driest places on Earth. The first chapter investigates the Anthrosols of the Atacama Desert, analyzing how traditional populations have transformed the soils through agriculture over several centuries. Soil samples from six villages were collected and analyzed for particle size distribution, organic matter, nutrients, electrical conductivity, and mineralogy. The results reveal three primary processes of anthrosolization: the construction of terraces with selected materials, irrigation with Andean meltwater to meet plant requirements without inducing salinization, and the addition of animal manure, which significantly increases the soil organic matter content and aids in nutrient cycling. These practices have improved soil structure, water retention, and fertility, indicating that the traditional management of these soils plays a fundamental role in sustainable agriculture in arid environments. Mineralogical analysis of the clay fraction highlighted the presence of secondary carbonates in some cultivated soils, likely resulting from irrigation, further illustrating the impact of human interventions on soil properties. The second chapter focuses on the agricultural terraces maintained by Lican Antai farmers, documenting their sophisticated water and soil management practices. Through open-ended interviews based on ethnopedological principles and quantitative soil analysis, this research reveals how traditional irrigation systems, regulated by local authorities such as directives and the Juez de Agua, have been crucial for sustaining agricultural production. Despite challenges posed by climate change, including reduced snowpack and irregular precipitation, these systems continue to function based on centuries of Indigenous traditional knowledge. An examination of soil management demonstrates that traditional agricultural practices—such as crop rotation, seasonal fallowing,

and organic fertilization—enhance soil fertility and promote long-term health, evidenced by higher organic matter content and stable pH and electrical conductivity levels. The study also emphasizes the spiritual and cultural dimensions of agricultural management, including the reverence for the goddess Pachamama, who represents the environment, and rituals like the *limpia de canales* (channel cleaning), reflecting a profound connection between the Lican Antai cosmovision and their agricultural practices. This dissertation highlights the intricate relationship between traditional knowledge, sustainable soil and water management, and the resilience of these communities in the face of climate change.

Keywords: ancestral management; agriculture; indigenous knowledge; Inca; anthrosolization; salinization; organic matter

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	12
REFERENCIAS	14
CAPÍTULO 1 Anthrosols on terraced soilscares of the Atacama Desert: physico-chemical attributes of millennial-scale cultivation legacy	16
1. INTRODUCTION	16
2. MATERIALS AND METHODS	18
2.1. Soil analysis and statistics	20
3. RESULTS	22
3.1. Poblados Atacameños: An overview	22
3.2. Clay Mineralogy	28
3.3. Comparison between traditionally cultivated versus natural areas of Atacama 30	
3.4. Granulometry	34
3.5. Chemical Attributes	34
3.6. Anionic compounds	35
3.7. Total Elemental Contents	36
4. DISCUSSION	37
4.1. Poblados Atacameños: General Aspects	37
4.2. Granulometry and morphology	38
4.3. Chemical attributes	40
4.4. Anionic compounds and total elemental contents	44
4.5. Mineralogy	47
5. CONCLUSIONS	48
6. REFERENCES	49
CAPÍTULO 2 Agricultura milenar de <i>terrazas</i> (Andenes) do Deserto do Atacama no cenário de mudanças climáticas	55

1. INTRODUÇÃO	55
2. DESENHO METODOLÓGICO	58
2.1. Área do Estudo.....	58
2.2. Entrevistas	60
2.3. Coletas e análises de solos.....	62
3. RESULTADOS	64
3.1. O manejo tradicional da água em <i>terrazas</i> e as percepções de mudanças climáticas	64
3.2. Manejo tradicional do Solo em <i>terrazas</i>	69
3.3. Indicadores do uso dos solos agrícolas do deserto.....	73
3.4. Rituais, crenças e a relação com o manejo e cuidado com a água e solo	76
4. DISCUSSÃO	78
4.1. O processo de alteração dos padrões climáticos.	78
4.2. As <i>terrazas</i> e o manejo do solo e da água.	80
4.3. Indicadores nas <i>terrazas</i> , uma outra evidência das benesses do manejo. ...	84
5. CONCLUSÃO.....	86
6. REFERENCIAS.....	87
CONCLUSÃO GERAL	93

INTRODUÇÃO GERAL

O Deserto do Atacama, o ambiente mais antigo e árido da Terra, constitui um dos cenários mais extremos do planeta (HARTLEY et al., 2005). Caracterizado por uma geografia e condições atmosféricas que inibem drasticamente a precipitação, a região ostenta índices elevadíssimos de radiação solar e taxas de evaporação que persistem há milhões de anos (CLARKE, 2006; GJORUP et al., 2019; HARTLEY; CHONG, 2002; VICENCIO VELOSO et al., 2024). Este cenário de aridez acentuada, contudo, contrasta com uma expressiva e milenar história de ocupação humana. Desde o início do Holoceno, grupos de caçadores-coletores percorreram este território, e há cerca de 3.000 anos antes do presente, floresceram práticas agrícolas e pastoris, que se estenderam até o Império Inca e perduram até os dias de hoje (GONZÁLEZ-PIZARRO; GALENO-IBACETA, 2018; PARCERO-OUBIÑA et al., 2017).

Compreender o que está por detrás da agricultura do deserto atacamenho, como ela é praticada em condições tão adversas, o que ela traz de conhecimento e técnicas milenares e contemporâneas e como comunidades agrícolas enfrentam a crise climática, são as questões que provocaram esta pesquisa. Para lidar com a severa limitação hídrica e a pobreza dos solos desérticos, os povos pré-hispânicos na região do Atacama desenvolveram técnicas sofisticadas, utilizadas até os dias de hoje, dentre as quais está as estruturas das terrazas. As *terrazas* ou Andenes são um tipo de terraço agrícola, amuralhado com pedras entalhadas nas encostas das montanhas, as quais permitem a estabilização do solo e o controle da erosão, ao mesmo tempo em que otimizam a conservação da umidade e viabilizaram o cultivo de alimentos essenciais (GONZÁLEZ-PIZARRO; GALENO-IBACETA, 2018; SANDOR et al., 2022).

Constata-se que a interação humana na paisagem desértica, sobretudo por meio da atividade agrícola tradicional, comunitária, ao longo de séculos, transformou profundamente a paisagem e os solos originais, dando origem ao que se denominam Antrossolos (Anthrosols). Nesta perspectiva, assume-se que as características físicas e químicas desses solos são um resultado do manejo agrícola tradicional milenar e muito específico dessa relação cultura-natureza. Os estudos pedológicos denominam os Antrossolos como uma classe de solos cuja gênese e evolução são predominantemente governadas pela atividade humana, a ponto de sobrepor os fatores naturais de sua formação (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022). Este processo ocorre através de intervenções profundas e sustentadas ao longo do tempo, como a

adição contínua de matéria orgânica (esterco, restos de cultura e/ou dejetos), a deposição de sedimentos por meio de irrigação, a construção de estruturas físicas como as *terrazas*, ou a incorporação de artefatos (HOWARD, 2017).

Após estudar os atributos físico-químicos dos Antrossolos, num primeiro momento, enfocamos, posteriormente, a partir de uma abordagem interdisciplinar, nos Antrossolos como elemento resultante das relações cultura e natureza da paisagem agrícola do Deserto. Para além das coletas de solo, interagimos com interlocutores da pesquisa, para entender um pouco desse solo que se apresenta hoje, dialogando com agricultoras e agricultores que se autodenominam *Lican Antai*. No Atacama, a *Ley 19253* (CHILE, 1993) reconhece a presença de diversas etnias indígenas naquele território, destacando-se os *Lican Antai*, sendo esses reconhecidos como povos herdeiros e mantenedores de sistemas agropastoris de elevada sustentabilidade e resiliência, adaptados ao clima extremo do Deserto do Atacama.

No mundo real e complexo, os povos do Atacama têm sua história marcada por descontinuidades e certas rupturas nesta relação cultura e natureza, com destaque recente para os efeitos mineração e das mudanças climáticas no acesso e uso da água (CARRASCO, 2016). Reconhece-se, por outro lado, que há um legado de resiliência e conhecimento ancestral que contribui para o enfrentamento de ameaças que são diversas ordens. Nesta perspectiva, focamos em estudar os Antrossolos manejados pelos *Lican Antai*, destacando, sobretudo, os efeitos das mudanças climáticas.

O aquecimento acelerado, particularmente em altas altitudes, impacta diretamente o derretimento dos campos de neve sazonais nos Andes, a principal fonte de água para a irrigação na região (NAGY et al., 2025; SENRA et al., 2019). A redução da precipitação de neve e a intensificação de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, colocam em risco a segurança hídrica e alimentar das comunidades locais (HUANG et al., 2017; LIAN et al., 2021).

A dissertação está estruturada em dois capítulos que, embora complementares, possuem focos e abordagens distintas:

O primeiro capítulo, de natureza pedológica e histórica, dedica-se a estabelecer a base material deste sistema agrícola. O foco recai sobre os solos ancestralmente manejados no Deserto do Atacama, investigando a intervenção humana milenar na origem de solos cultiváveis em meio ao deserto. Por meio de análises físicas, químicas

e mineralógicas, o capítulo caracteriza esses solos, comparando-os com áreas não manejadas para quantificar o impacto das práticas agrícolas tradicionais. Nele se propõe desvendar como a combinação de três ações humanas fundamentais transformou o substrato desértico, sendo elas, a engenharia do solo durante a construção dos *terrazas*, o manejo da irrigação com águas de degelo dos Andes e a adição de matéria orgânica. Desta forma, o capítulo estabelece as evidências da engenhosidade agrícola tradicional, argumentando que estes solos são mais do que um meio de cultivo, mas sim, um arquivo cultural e tecnológico que detém lições valiosas sobre a resiliência e a sustentabilidade em ambientes extremos.

O segundo capítulo avança para o tempo presente, adotando uma abordagem qualitativa e exploratória para compreender a dimensão humana e a resiliência dos sistemas agrícolas frente aos desafios contemporâneos. Inspirado nos preceitos da etnopedologia (*corpos*: cognição, *praxis*: ação e *cosmos*: simbolismos), este capítulo de caráter descritivo se aprofunda no conhecimento local dos agricultores e agricultoras *Lican Antai*. Utilizando entrevistas abertas, a investigação busca trazer sobre como são as estratégias e saberes práticos que os agricultores mobilizam para manejar o solo e a água, suas decisões sobre o uso dos recursos e as respostas adaptativas às secas e outros eventos extremos e sua cosmovisão. Para dar robustez à análise qualitativa, os dados das entrevistas são acrescidos com análises de solo na busca de evidências que sobre as práticas de manejo realizadas pelos *Lican Antai*. Assim, este capítulo conecta o legado histórico-material (os solos do capítulo 1) à agência, ao conhecimento e à cultura das pessoas que mantêm esse sistema vivo mesmo ameaçadas pelas mudanças globais.

REFERENCIAS

CARRASCO, Anita. A biography of water in Atacama, Chile: two indigenous community responses to the extractive encroachments of mining. **The Journal of Latin American and Caribbean Anthropology**, v. 21, n. 1, p. 130-150, 2016.

CLARKE, J. D. A. Antiquity of aridity in the Chilean Atacama Desert. **Geomorphology**, v. 73, n. 1–2, p. 101–114, 2006.

GJORUP, D. F. et al. Pedoclimate monitoring in the periglacial high mountain soils of the Atacama Desert, northern Chile. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 30, n. 4, p. 310–329, 2019.

GONZÁLEZ-PIZARRO, J. A.; GALENO-IBACETA, C. Natural and Cultural Landscapes in Atacama Desert: Between Tradition and Innovation. In: **Landscape Architecture - The Sense of Places, Models and Applications**. [S.l.]: InTech, 2018.

HARTLEY, A. J. et al. 150 million years of climatic stability: evidence from the Atacama Desert, northern Chile. **Journal of the Geological Society**, v. 162, n. 3, p. 421–424, 2005.

HARTLEY, A. J.; CHONG, G. Late Pliocene age for the Atacama Desert: Implications for the desertification of western South America. **Geology**, v. 30, n. 1, p. 43, 2002.

HOWARD, J. **Anthropogenic Soils**. Cham: Springer International Publishing, 2017.

HUANG, J. et al. Dryland climate change: Recent progress and challenges. **Reviews of Geophysics**, v. 55, n. 3, p. 719–778, 2017.

IUSS WORKING GROUP WRB. **World Reference Base for Soil Resources**: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4. ed. Vienna: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022.

LIAN, X. et al. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 2, n. 4, p. 232–250, 2021.

MIRZABAEV, A. et al. Desertification. In: **Climate Change and Land**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2022. p. 249–344.

NAGY, B. et al. Surface hydrology on the highest volcano of the high Dry Andes, the Ojos del Salado; interannual fluctuations and moisture sources. **Journal of Hydrology**, v. 653, p. 132741, 2025.

PARCERO-OUBIÑA, C. et al. Ground to air and back again: Archaeological prospection to characterize prehispanic agricultural practices in the high-altitude Atacama (Chile). **Quaternary International**, v. 435, p. 98–113, 2017.

SANDOR, J. A. et al. Soils in ancient irrigated agricultural terraces in the Atacama Desert, Chile. **Geoarchaeology**, v. 37, n. 1, p. 96–119, 2022.

SENRA, E. O. et al. Holocene pedogenesis along a chronotoposequence of soils from the Altiplano to the Cordillera Real, Bolivian Andes. **CATENA**, v. 178, p. 141–153, 2019.

VICENCIO VELOSO, J. et al. The Overlooked Role of Moist Northerlies as a Source of Summer Rainfall in the Hyperarid Atacama Desert. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 129, n. 21, 2024.

CAPÍTULO 1

ANTHROSOLS ON TERRACED SOILSCAPES OF THE ATACAMA DESERT: PHYSICO-CHEMICAL ATTRIBUTES OF MILLENNIAL-SCALE CULTIVATION LEGACY.

1. INTRODUCTION

The Atacama Desert is the oldest desert environment on Earth, with signs of aridity dating back to late Jurassic (165 MA) and hyperaridity since the Oligocene (25 MA) (HARTLEY et al., 2005). This unique climate is primarily attributed to the region's geography and atmospheric conditions. The Atacama lies to the west of the rainshadow effect formed by the high Andes mountains to the east, which prevents moist air from Amazon basin from flowing into the region (VICENCIO VELOSO et al., 2024). In addition, the cold Humboldt Current that flows along the Pacific coast off Chile reinforces this stabilization of atmospheric conditions inhibiting precipitation (HARTLEY; CHONG, 2002). Aligned with that, high indexes of solar radiation and rates of evaporation that have persisted for million years, make the Atacama the driest desert on Earth (CLARKE, 2006; GJORUP et al., 2019). Consequently, the average annual rainfall in the Atacama Desert is less than 1 mm/year, while some parts have received virtually no rain for decades (FUENTES et al., 2022). Despite all this, pre-Hispanic societies, dating back to 3950 b.p., coaxed harvests from the Andes' tough climate, especially maize (*Zea mays*), quinoa (*Chenopodium quinoa*) and potato (*Solanum tuberosum*), by means of irrigation canals, cisterns and, above all, stone-walled terraces (*Andenes*, *Anchakas*, *Pata Pata*) cut into the sloping hillsides (DENEVAN, 2001; GRABER, 2011; TREACY, 1994).

Despite the extreme aridity, the Atacama shows unequivocal occupation signs by hunters-gatherers since the early Holocene with agricultural and pastoral activity that began 3000 years b.p., and lasted to Inca's Empire occupation (c. 900 – 1536) (González-Pizarro; Galeno-Ibaceta, 2018; Parcero-Oubiña et al., 2017). To practice agriculture in the desert, under severe water limitations, the local population had to develop many local adaptations to face scarce water availability, employing terracing techniques and irrigation (SANDOR et al., 2022). At the height of the Incan civilization, more than a million hectares of terraces were found in the highlands of Peru, Bolivia and northern Chile, alone (GRABER, 2011).

In this respect, we have the earliest known account of Inca Terraces and their use from a seminal book by the cronist Garcilaso de la Vega (1539–1616), the son of an Inca noblewoman and a Spanish conquistador (DE LA VEGA, 1991).

“After conquering new territory, the Incas began expanding the amount of agricultural land by bringing in skilled engineers. After digging the irrigation canals, they leveled the fields so that the irrigation water could be distributed properly.” “They also built terraces on the mountains and slopes, where the soil was good. This way the whole hill was gradually cultivated, the platforms being leveled like the steps of a ladder, and all the cultivable and irrigable land being utilized.” “The newly expanded land was later divided into three parts: one for the Inca emperor; another for religious purposes; and a third for the community, whose plots were distributed among local leaders.”

In the Andes, slope stabilization and erosion control are critical concerns in agricultural practices (GOODMAN-ELGAR, 2008). The terracing technique was an effective pre-hispanic method of mountain agriculture that involves constructing a series of platforms, in a stepped formation, that contours a hillside or slope, allowing the use of land in rugged terrain, offering better moisture conservation and flood control (WRIGHT, 1963). Different types of Andean terraces can be found, like sloping fields, benched, broad fields and check dams (Denevan, 2001) being built and maintained by different traditional tools (Figure 1).

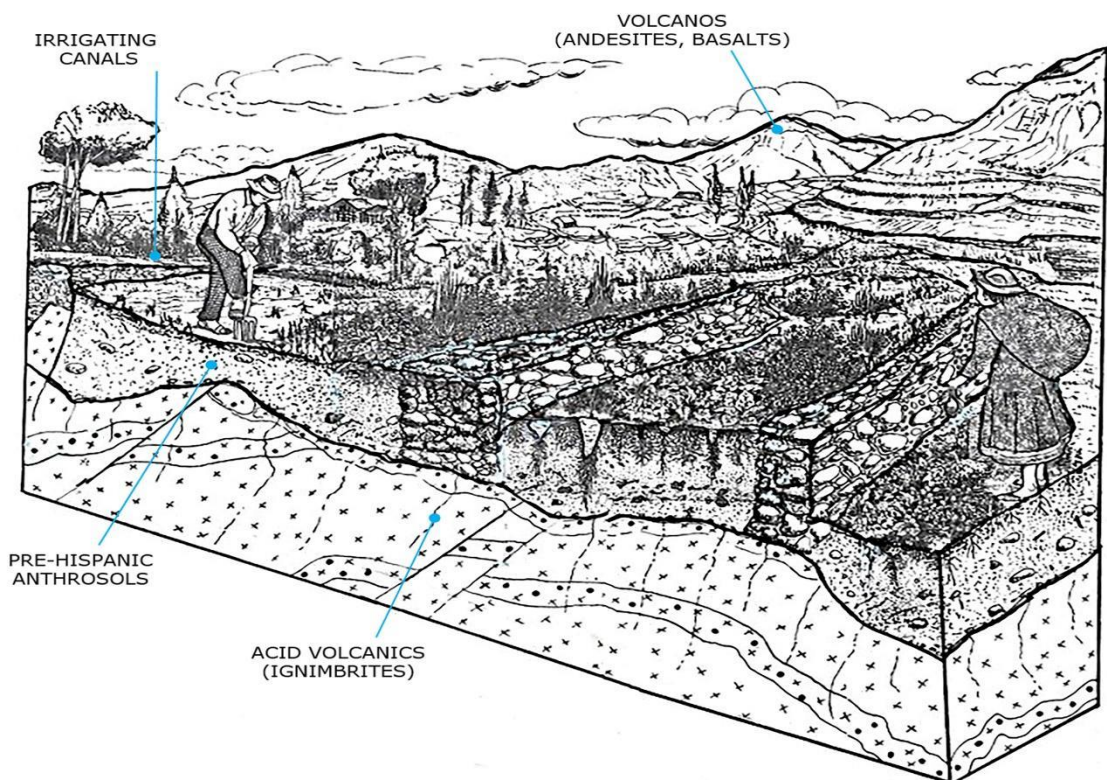


Figure 1. Block Diagram of the Archeological soilscape with stone-walled bench terraces, at a Typical High Andes Poblado (inspired in Ayquina), very much similar to those described by Garcilaso de la Vega in 1609. It also illustrates some

landscape elements and people, representing the villages that have learnt how to thrive and live sustainably, in the last 3000 years in the driest desert on Earth.

Over time, these traditional agricultural soils have undergone various processes combined with continuous human intervention, showcasing the great influence of anthropogenic activities on the natural processes of pedogenesis (VILLAGRÁN; CASTRO, 2004). These processes create a distinct type of soil, known as Anthrosol, as classified by the IUSS WORKING GROUP WRB (2022).

Anthrosols are formed through a variety of human-induced processes, including the addition of new materials, the extensive modification of existing soil properties, and the redistribution of surface materials (SAIANO; SCALENGHE, 2009). The physical and chemical characteristics of these soils can vary greatly, depending on the human activities that have shaped their formation (ARENS et al., 2021; SILVA E SILVA et al., 2024; ZHAO et al., 2023). They commonly exhibit high levels of organic matter, nutrients or other chemical compounds, reflecting the introduction of anthropogenic materials or the alteration of natural soil processes (ARROYO-KALIN; NEVES; WOODS, 2009; CHUPINA, 2020; SCHAEFER et al., 2004; VASILCHENKO; VASILCHENKO, 2024).

Currently, there is limited knowledge on terraced soils associated with traditional agriculture in Atacama. To fill this gap, we present a study of Anthrosols from the Atacama Desert, examining how the local traditional peoples managed and transformed the soils for a sustainable agriculture in the world's driest desert.

2. MATERIALS AND METHODS

The study was conducted in six Poblados from the Atacama Desert, at the Antofagasta region, El Loa province. Four of the villages are part of Alto El Loa, the northernmost part of the province (Ayquina, Caspana, Cupo and Toconce). The other two (Camar and Socaire) are near San Pedro de Atacama, on the southernmost part of the province. The overview of the area is illustrated in the map below (Figure 2).

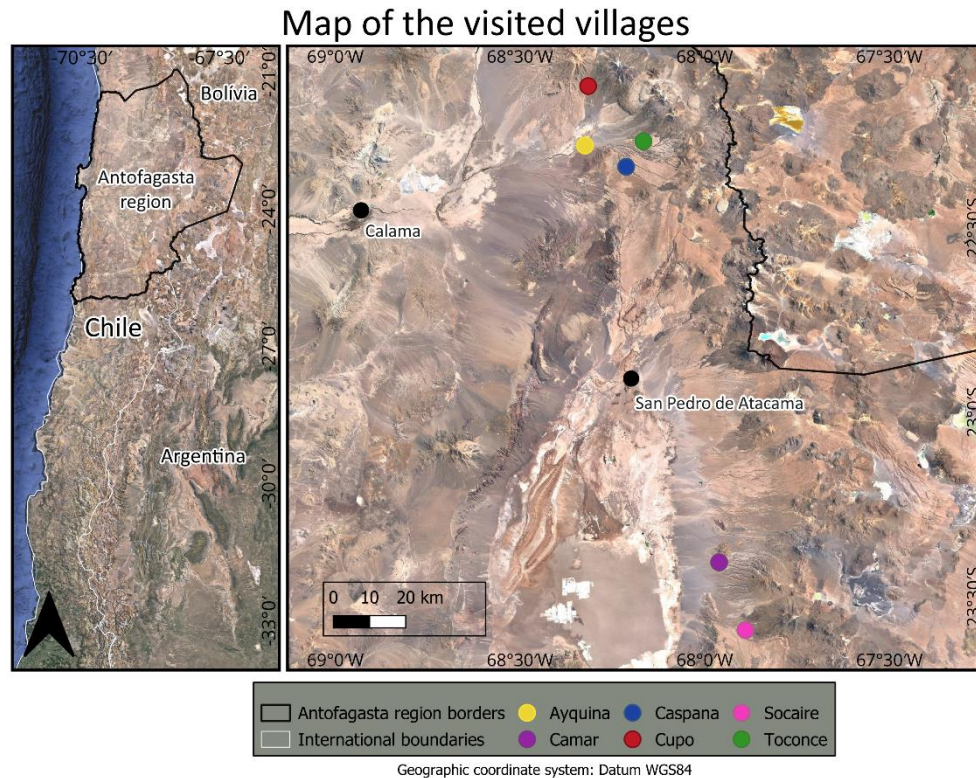


Figure 2. Localization map of the studied villages

A general characterization of the villages with their environmental characteristics and samples quantities are on the table below (Table 1). The field survey was carried out in January 2024. Samples of terraced soils were collected in triplicates for each selected area within the villages. Including man-made terraces that have been traditionally cultivated (CS) and adjacent reference natural areas that have never been cultivated (NCS). Soil samples were collected manually using a Dutch auger at two depth intervals: 0–20 cm and 20–40 cm. Sampling was carried out separately for each soil layer, allowing for specific characterization of each stratum. However, for the purposes of data interpretation and presentation of results, the values obtained were subsequently grouped to form an integrated 0–40 cm layer, aiming to provide a consolidated representation of the surface profile most influenced by management practices. For CS, 72 samples were collected, which were compared with 24 from reference, adjacent sites, at the same depths.

Table 1. Village's environmental synthesis and samples amounts

Villages	Relief of the villages	Drainage	T ⁽¹⁾	AP ⁽²⁾	Altitude	Samples' number	
						CS	NCS
Ayquina	High segments of the canyon, midslopes and footslopes	Salado River	17.50 ± 0.01	36.81 ± 0.19	3026 ± 28	9	3
Camar	Gentle hills, footslopes	Quebrada de Camar	16.70 ± 0.04	45.28 ± 0.15	2717 ± 25	12	3

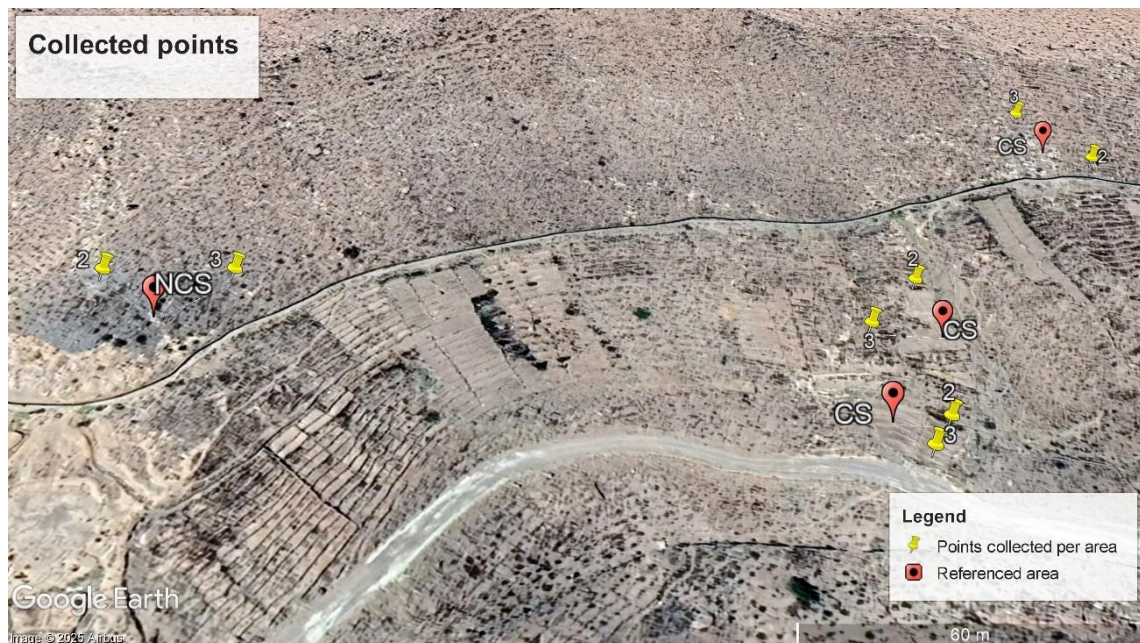
Caspana	Caspana floodplain and River Valley with small tributaries (quebradas)	Caspana River	17.05 ± 0.03	41.91 ± 0.19	3263 ± 49	9	3
Cupo	Higher segments of the canyon, footslopes	Quebrada de Cupo	16.67 ± 0.01	42.03 ± 0.58	3363 ± 27	6	3
Socaire	Gentle undulating slopes and footslopes	Quebrada de Socaire	16.60 ± 0.01	47.38 ± 0.14	3262 ± 30	12	6
Toconce	High scarps, canyon midslopes and footslopes	Toconce River	16.88 ± 0.08	43.46 ± 0.56	3300 ± 50	24	6

Altitude masl (Neal and Hawker, 2023)

(1) Mean of monthly temperature °C (Fick and Hijmans, 2017),

(2) Annual precipitation mm.y⁻¹ (Fick and Hijmans, 2017)

The illustrated scheme (Figure 3) demonstrates the sampling design, using one of the sampled areas in Toconce as an example. For each referenced area, three points were sampled, the red marker as point 1 and the yellow makers as points 2 and 3. Sampling in each pueblo was conducted based on the accessibility of permitted areas and their relevance to the context of our study (Table 1).



Maps data: Google © 2025 Airbus

Figure 3. Example of sampling procedure in one of the areas of Toconce.

2.1. Soil analysis and statistics

The morphological description of the soils was carried out according to Santos et al. (2015). Samples were air-dried, sieved (2 mm) and the fine-earth grounded to 105 mesh for uniformization. The quantification of gravel in relation to fine particles (particles with size < 2 mm) were made by sieving and weighing of the particles. In the

laboratory the following attributes were determined in dry fine earth: granulometry (% sand, silt and clay), organic matter (OM), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), sodium (Na), calcium (Ca), magnesium (Mg), copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn), and zinc (Zn) contents following the standard procedures by Teixeira et al. (2017). The granulometry was analyzed through physical and chemical dispersion, according to Stokes law, and separated by sieving (sand fractions) and by differential sedimentation in water (clay and silt). The amount of available P, K, Na, Cu, Fe, Mn, and Zn were determined using the Mehlich-1 extractor, while exchangeable Ca and Mg were measured by spectrometry. Total N was quantified using the Kjeldahl digestion method, and the OM content was determined using the Walkley-Black method, with heating.

We also measured soil Electrical Conductivity (EC) in 1:5 soil/water extract using the dilution method (Rayment; Lyons, 2011), to assess the salinity. The anions bromide (Br⁻), chloride (Cl⁻), fluoride (F⁻), phosphate (PO₄³⁻), nitrate (NO₃⁻) and sulfate (SO₄²⁻) were determined by ion chromatography. The saline extract was prepared with a 1:5 soil/water ratio and agitated at 250 RPM for 1 hour, then centrifuged at 3000 RPM for 1 minute and vacuum filtered through a 0.45 µm membrane. The extract was subjected to a Metrohm ECO IC ion chromatograph with a Metrosep A Supp 17 – 250/4.0 analytical column.

X-ray fluorescence (XRF) analysis was used to determine the total elemental concentrations in soil samples. Prior to analysis, samples were air-dried, disaggregated, and sieved to remove particles larger than 2 mm. Subsequently, a representative subsample was finely ground and sieved to 100 mesh. The powdered material was fused with lithium tetraborate to form glass discs, which were analyzed for total elemental concentrations using a Thermo Scientific™ ARL™ PERFORM'X XRF spectrometer under vacuum conditions.

The mineralogical characterization of the collected soils was based on the identification of the minerals in the clay fraction of both CS and NCS samples, through X-ray diffractometry (TEIXEIRA ET AL., 2017). To identify 2:1 minerals, five treatments were performed: magnesium saturation, application of glycerol to the slides with magnesium, potassium saturation, heating of the potassium saturated slides at 350 and heating of the same slides at 550 °C. The diffraction patterns were interpreted according to the criteria of Chen (1977) and Whittig and Allardice (1986).

We used the R software (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2023) to analyze and represent the data more effectively. Boxplots were made using the 'ggplot2' package (Wickham, 2016), and descriptive statistics were applied to the data using VBA codes in Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2025). The Shapiro-Wilk statistical test was used to confirm the non-normality of the data distribution and the Kruskal-Wallis test was used to assess which variables statistically differs in the soils with a comparison of all parameters between them. In addition, we applied the Kendall test was applied to determine associations between parameters in CS. The statistical tests were all made with R core functions.

3. RESULTS

3.1. Poblados Atacameños: An overview

The Atacama villages have distinct characteristics in terms of agricultural areas, lithology, crops and sources of water for irrigation. Table 2 illustrates this geoenvironmental synthesis.

According to the Shapiro-Wilk test, most of the data do not follow a normal distribution pattern, so it is necessary to analyze them in a way that represents the central tendency in the best way, with the median, absolute standard deviation (ASD) and coefficient of resistant variation.

Table 2. Geoenvironmental characterization of the studied villages from the Atacama

Pueblo	Lithology	Landforms of terraced landscapes	Main crops	Source of Water for irrigation
Ayquina	Acid volcanics (Ignimbrites) and piroclastics (tuffs)	Scarp and steep slopes down to footslopes	Maize, pumpkin, chard and sunflower	Slope-like springs
Camar	Glacigenic deposits (fluvio-lacustrine) and moraines	Gentle undulating hills	Tomatoes, maize, pumpkin and fruit trees	Springs and drainage canals
Caspana	Acid volcanics (Ignimbrites) and piroclastics (tuffs)	Scarp and steep slopes down to footslopes and bottom valley (terraces, alluvial fans) at Caspana River and tributaries	Maize, potatoes, broad beans, alfalfa, fruit trees and flowers	Springs and drainage canals (Caspana River)
Cupo	Glacigenic deposits (fluvio-lacustrine) and scree-slopes	Gentle undulating plateau and canyon scarps	Potatoes, broad beans, alfalfa and quinoa	Higher springs and canals
Socaire	Basalts and diabases;	Footslopes and broad valleys of gentle	Broad beans, maize, sweet	Higher springs and canals

	Piroclastics of basaltic composition, tuffs	undulating hills and slopes	potatoes, sunflower and wheat	
Toconce	Acid volcanics (Ignimbrites) and piroclastics (tuffs)	Scarps and steep slopes down to footslopes and bottom valley (terraces, alluvial fans)	Potatoes, maize, alfalfa, cassava and quinoa	Higher springs and drainage canals (Toconce River)
Lithology (SERNAGEOMIN, 2003).				

The granulometry of the village samples follows a general pattern of higher contents of Fine Particles in CS, compared to NCS, except in Ayquina and Cupo. Consequently, there were higher gravel contents in the CS of Ayquina and Cupo, compared to NCS; in the other villages, the CS revealed lower gravel contents compared to NCS (Table 3).

Table 3. Median, absolute standard deviation and p value from KW test of the villages granulometry.

Attributes (g/kg)		Coarse Sand	Fine Sand	Silt	Clay	Gravel	Fine Particles
Ayquina	CS	479 ± 88	207 ± 56	115 ± 50	137 ± 30	155 ± 62	845 ± 62
	NCS	217 ± 103	286 ± 57	256 ± 85	197 ± 43	124 ± 50	876 ± 50
	p	<0.01*	0.03*	0.01*	0.15	0.46	0.46
Camar	CS	343 ± 50	315 ± 49	173 ± 58	169 ± 30	175 ± 47	825 ± 47
	NCS	473 ± 28	362 ± 29	90 ± 10	64 ± 11	437 ± 64	563 ± 64
	p	<0.01*	0.04*	<0.01*	<0.01*	<0.01*	<0.01*
Caspana	CS	524 ± 66	241 ± 25	125 ± 42	107 ± 18	141 ± 36	859 ± 36
	NCS	475 ± 25	226 ± 18	177 ± 23	123 ± 11	369 ± 49	631 ± 49
	p	0.35	0.15	0.05	0.11	<0.01*	<0.01*
Cupo	CS	282 ± 37	349 ± 78	238 ± 57	122 ± 28	195 ± 66	805 ± 66
	NCS	139 ± 32	457 ± 87	189 ± 27	180 ± 42	160 ± 90	840 ± 90
	p	<0.01*	0.03*	0.19	0.06	0.78	0.78
Socaire	CS	338 ± 106	317 ± 49	178 ± 72	138 ± 49	111 ± 35	889 ± 35
	NCS	414 ± 111	302 ± 70	100 ± 41	203 ± 108	328 ± 136	672 ± 136
	p	0.73	0.66	0.02*	0.23	<0.01*	<0.01*
Toconce	CS	406 ± 83	294 ± 79	155 ± 46	122 ± 32	199 ± 115	801 ± 115
	NCS	433 ± 85	207 ± 96	152 ± 57	117 ± 21	320 ± 89	680 ± 89
	p	0.27	0.11	0.71	0.34	0.07	0.07

* Values bellow 0.05 meaning difference statistically significant

In the CS of Ayquina, there was a reduction in fine sand content (207 ± 56 g/kg) and silt content (115 ± 50 g/kg) compared to the NCS, which presented 286 ± 57 g/kg of fine sand and 256 ± 85 g/kg of silt. In Camar, CS exhibited lower fine sand content

(315 ± 49 g/kg) and higher silt (173 ± 58 g/kg) and clay contents (169 ± 30 g/kg) relative to NCS, which showed 362 ± 29 g/kg of fine sand, 90 ± 10 g/kg of silt, and 64 ± 11 g/kg of clay. In Caspana, silt content was lower in CS (125 ± 42 g/kg) than in NCS (177 ± 23 g/kg), while no relevant differences were observed for the other fractions. In Cupo, CS showed a decrease in fine sand content (349 ± 78 g/kg) compared to NCS (457 ± 87 g/kg). In Socaire, an increase in silt content was observed in CS (178 ± 72 g/kg) relative to NCS (100 ± 41 g/kg). In Toconce, no substantial differences were identified in the contents of fine sand (294 ± 79 g/kg in CS and 207 ± 96 g/kg in NCS), silt (155 ± 46 g/kg in CS and 152 ± 57 g/kg in NCS), or clay (122 ± 32 g/kg in CS and 117 ± 21 g/kg in NCS).

The soil colors of the village samples (CS and NCS) present more yellowish hues (≥ 7.5 YR), with low to medium/high (v) values in CS ($2 \leq v \leq 6$); and low to high ($2 \leq v \leq 7$) and generally lower chromas (< 4) in NCS. The soil structure in CS is predominantly weak and poorly developed, with small to very small structural units in subangular blocks. In NCS, they vary from single grain, predominant, to weak in subangular blocks (Table 4).

Table 4. Soil morphological attributes.

Pueblo	Depth (cm)	Munsell Color				Structure	
		CS		NCS		CS	NCS
		Dry	Umid	Dry	Umid		
Ayquina	0 - 20	10YR 4/2	10YR 3/2	10YR 4/3	10YR 4/3	fr p bs	fr mp bs
	20 - 40	10YR 3/2	10YR 2/1	10YR 2/2	10YR 2/2		
Camar	0 - 20	10YR 5/2	7.5YR 2.5/2	7.5YR 7/2	7.5YR 4/3	fr mp bs	gs
	20 - 40	10YR 5/2	10YR 4/2	7.5YR 6/2	7.5YR 5/3		
Caspana	0 - 20	10YR 5/3	10YR 4/3	7.5YR 6/3	10YR 7/3	fr p bs	gs
	20 - 40	10YR 5/2	10YR 3/2	7.5YR 5/4	10YR 5/4		
Cupo	0 - 20	10YR 5/3	10YR 4/4	10YR 6/4	10YR 5/3	fr mp bs	fr mp bs
	20 - 40	10YR 5/3	10YR 4/5	10YR 6/3	10YR 5/3		
Socaire	0 - 20	7.5YR 5/3	7.5YR 5/3	5YR 6/4	5YR 5/4	fr p bs	gs
	20 - 40	7.5YR 2.5/3	7.5YR 3/3	5YR 4/4	5YR 4/6		
Toconce	0 - 20	10YR 6/3	10YR 3/3	10YR 6/3	10YR 4/3	fr p bs	gs
	20 - 40	10YR 6/2	10YR 4/4	7.5YR 6/3	7.5YR 5/4		

fr: fraca, p: pequeno, mp: muito pequeno, bs: bloco subangular, gs: grão simples

The chemical attributes of CS and NCS for the different villages are represented by the mode and absolute standard deviation, and the p values obtained in the KW test (Table 5).

Table 5. Median, absolute standard deviation and p value from KW test of the village's chemical attributes

Attributes		pH H2O	pH KCl	EC (uS/cm)	N (mg/dm ³)	P (mg/dm ³)	K (cmolc/dm ³)	Na (cmolc/dm ³)	Ca2+ (cmolc/dm ³)	Mg2+ (cmolc/dm ³)	OM (dag/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Ayquina	CS	8.50 ± 0.23	7.96 ± 0.13	3615 ± 3763.17	1.17 ± 0.39	260.80 ± 143.16	1.52 ± 1.68	10.49 ± 10.31	11.12 ± 4.77	2.77 ± 1.72	2.89 ± 1.04	1.21 ± 1.80	17.25 ± 12.67	4.00 ± 4.06	0.94 ± 2.83
	NCS	8.49 ± 0.16	8.28 ± 0.11	72510 ± 115618.33	2.14 ± 0.70	483.90 ± 247.38	6.59 ± 3.73	74.80 ± 58.68	20.20 ± 22.56	11.65 ± 6.10	5.56 ± 2.23	0.97 ± 1.54	11.80 ± 13.40	3.55 ± 3.84	0.43 ± 0.60
	p	0.79	<0.01*	0.01*	0.23	0.1	0.01*	<0.01*	0.08	0.01*	0.26	0.53	0.37	0.51	0.19
Camar	CS	8.50 ± 0.18	7.97 ± 0.12	494.15 ± 574.60	1.84 ± 0.76	127.40 ± 55.75	0.73 ± 0.19	1.51 ± 1.35	9.11 ± 1.34	4.54 ± 1.95	3.09 ± 1.67	0.23 ± 0.04	6.05 ± 3.72	2.20 ± 0.59	0.00 ± 0.01
	NCS	8.99 ± 0.09	8.03 ± 0.06	141.70 ± 15.93	0.07 ± 0.02	220.70 ± 46.61	0.70 ± 0.23	0.18 ± 0.03	3.92 ± 0.30	0.46 ± 0.03	0.03 ± 0.03	2.72 ± 2.70	6.25 ± 2.30	10.30 ± 2.15	0.34 ± 0.27
	p	<0.01*	0.53	<0.01*	<0.01*	0.1	0.35	<0.01*	<0.01*	<0.01*	<0.01*	<0.01*	0.53	<0.01*	<0.01*
Caspana	CS	7.92 ± 0.18	7.13 ± 0.17	272.85 ± 184.82	0.92 ± 0.41	306.60 ± 54.05	1.11 ± 0.31	1.14 ± 0.32	11.07 ± 1.67	2.05 ± 0.56	1.78 ± 0.93	5.15 ± 4.46	58.45 ± 15.36	21.00 ± 4.55	7.98 ± 4.08
	NCS	8.64 ± 0.35	7.26 ± 0.30	116.75 ± 17.38	0.14 ± 0.05	152.90 ± 115.72	1.37 ± 0.33	0.47 ± 0.08	11.77 ± 0.95	0.92 ± 0.35	0.13 ± 0.09	2.17 ± 2.41	17.25 ± 14.16	35.05 ± 8.62	0.88 ± 0.95
	p	0.02*	0.39	<0.01*	<0.01*	0.02*	0.16	<0.01*	0.35	0.01*	<0.01*	0.02*	<0.01*	<0.01*	<0.01*
Cupo	CS	8.62 ± 0.09	7.85 ± 0.05	440.4 ± 157.03	0.99 ± 0.38	35.6 ± 22.90	1.22 ± 0.19	1.84 ± 0.90	8.28 ± 0.95	5.02 ± 0.94	1.35 ± 0.97	4.96 ± 5.27	27.3 ± 9.63	12.9 ± 3.71	1.29 ± 1.47
	NCS	7.41 ± 0.32	6.63 ± 0.28	124.3 ± 37.03	0.60 ± 0.14	61.7 ± 36.18	1.00 ± 0.06	0.26 ± 0.05	6.78 ± 0.80	1.88 ± 0.31	0.68 ± 0.19	14.32 ± 26.86	41.6 ± 19.12	53.1 ± 10.79	1.87 ± 3.48
	p	<0.01*	<0.01*	<0.01*	0.13	0.35	0.06	<0.01*	0.01*	<0.01*	0.01*	0.09	0.22	<0.01*	0.61
Socaire	CS	8.36 ± 0.13	7.48 ± 0.13	184.55 ± 90.13	1.04 ± 0.80	142.20 ± 54.47	1.15 ± 0.30	0.79 ± 0.41	10.39 ± 3.10	4.55 ± 1.80	1.83 ± 1.62	0.94 ± 1.07	51.65 ± 16.85	12.45 ± 4.77	1.50 ± 0.63
	NCS	7.76 ± 0.27	6.38 ± 0.29	110.90 ± 41.89	0.23 ± 0.07	87.55 ± 57.96	1.11 ± 0.24	0.38 ± 0.14	8.62 ± 4.25	3.78 ± 2.29	0.24 ± 0.25	3.22 ± 2.04	25.35 ± 10.49	21.85 ± 4.48	0.77 ± 0.59
	p	<0.01*	<0.01*	0.03*	<0.01*	0.05	0.89	0.05	0.3	0.62	<0.01*	<0.01*	<0.01*	<0.01*	0.02*
Toconce	CS	7.82 ± 0.37	6.54 ± 0.39	138.75 ± 139.10	0.76 ± 0.48	84.90 ± 82.52	1.23 ± 0.28	0.87 ± 0.38	6.65 ± 1.90	2.15 ± 0.62	0.91 ± 1.43	5.21 ± 4.59	30.80 ± 16.26	11.20 ± 5.88	2.99 ± 2.49
	NCS	7.47 ± 0.39	5.98 ± 0.57	76.58 ± 125.40	0.32 ± 0.18	134.70 ± 52.47	0.91 ± 1.89	0.17 ± 1.01	5.03 ± 0.82	1.64 ± 0.51	0.30 ± 0.57	3.90 ± 4.54	21.45 ± 13.86	22.15 ± 12.84	0.97 ± 1.09
	p	0.02*	0.01*	<0.01*	<0.01*	0.90	0.07	<0.01*	0.01*	0.03*	0.01*	0.78	0.06	<0.01*	0.01*

* Values bellow 0.05 meaning difference statistically significant

The comparative analysis between the villages reveals that the CS generally present higher values in relation to the NCS, with significant differences in the total N, OM and EC contents. However, the village of Ayquina stands out for not following this general pattern, registering a significant difference in EC, with considerably higher values in the NCS ($72510 \pm 115618.33 \mu\text{S/cm}$) compared to the CS ($3615 \pm 3763.17 \mu\text{S/cm}$). Furthermore, Ayquina presents the highest electrical conductivity indexes among all the analyzed villages, including in CS, where the values are much higher than those of other locations, such as Camar ($494.15 \pm 574.60 \mu\text{S/cm}$), Caspana ($272.85 \pm 184.82 \mu\text{S/cm}$), Cupo ($440.4 \pm 157.03 \mu\text{S/cm}$), Socaire ($184.55 \pm 90.13 \mu\text{S/cm}$) and Toconce ($138.75 \pm 139.10 \mu\text{S/cm}$).

In general, CS soils present higher concentrations of N, OM and P. Nitrogen is higher in CS, such as in Ayquina ($1.17 \pm 0.39 \text{ mg/dm}^3$), Camar ($1.84 \pm 0.76 \text{ mg/dm}^3$) and Socaire ($1.04 \pm 0.80 \text{ mg/dm}^3$), while in NCS the values are lower, such as $0.07 \pm 0.02 \text{ mg/dm}^3$ in Camar and $0.23 \pm 0.07 \text{ mg/dm}^3$ in Socaire. Organic matter also follows a similar pattern, with significantly higher values in CS, such as in Ayquina ($2.89 \pm 1.04 \text{ dag/kg}$) and Camar ($3.09 \pm 1.67 \text{ dag/kg}$), while in NCS the values are quite low, reaching only $0.03 \pm 0.03 \text{ dag/kg}$ in Camar. P, on the other hand, presents variations between the villages: in Cupo, for example, the levels are slightly higher in NCS ($61.7 \pm 36.18 \text{ mg/dm}^3$ versus $35.6 \pm 22.90 \text{ mg/dm}^3$ in CS), while in Toconce and Camar the differences are less pronounced, with relatively balanced values between CS and NCS.

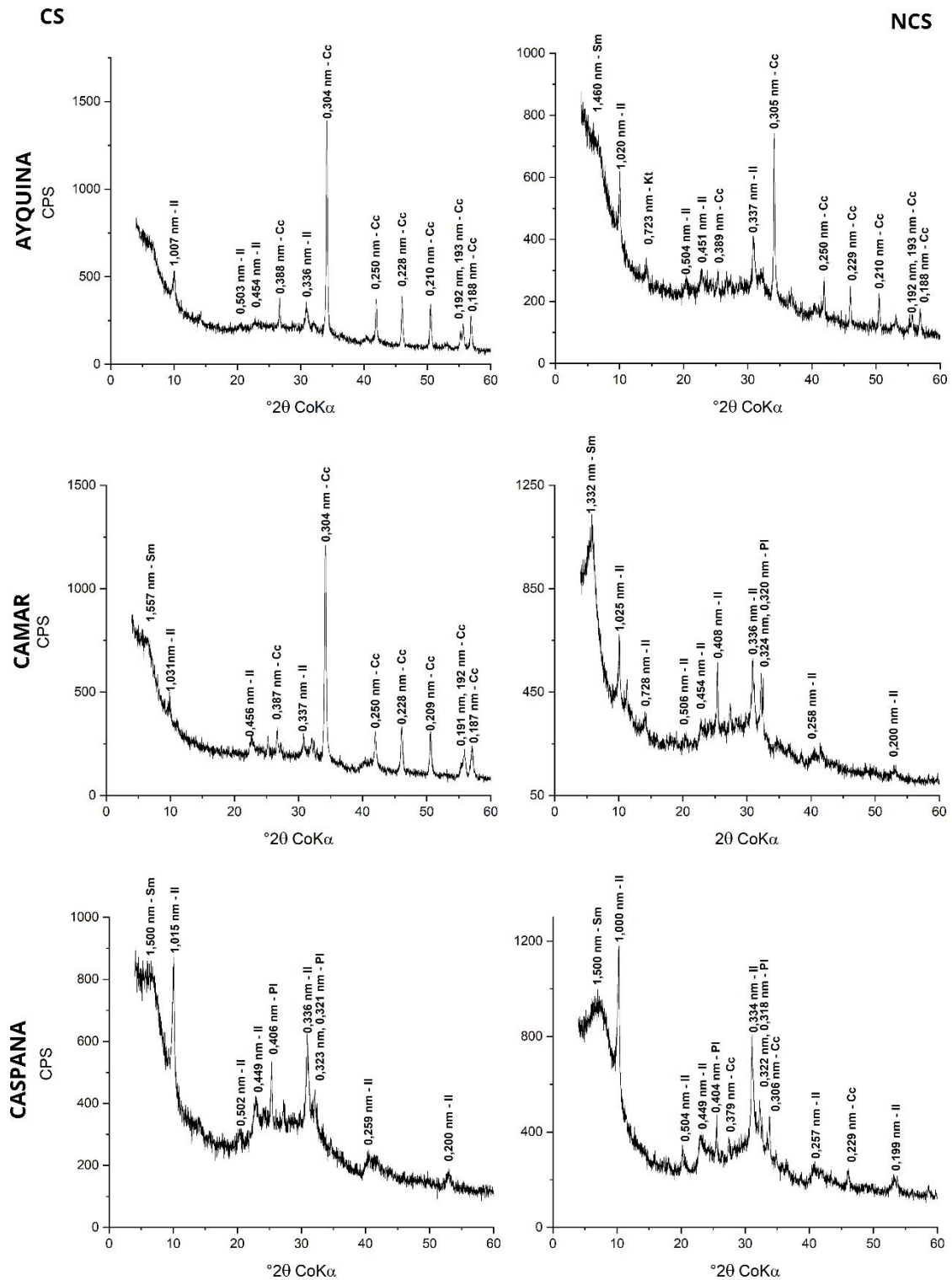
The concentrations of exchangeable bases also show distinct patterns among the villages. They are significantly higher in the CS, such as in Ayquina ($10.49 \pm 10.31 \text{ cmolc/dm}^3$) and Cupo ($1.84 \pm 0.90 \text{ cmolc/dm}^3$), while in the NCS the values are considerably lower, such as $0.26 \pm 0.05 \text{ cmolc/dm}^3$ in Cupo and $0.38 \pm 0.14 \text{ cmolc/dm}^3$ in Socaire. Ca^{2+} and Mg^{2+} also tend to be higher in CS, such as in Ayquina (Ca^{2+} : $11.12 \pm 4.77 \text{ cmolc/dm}^3$; Mg^{2+} : $2.77 \pm 1.72 \text{ cmolc/dm}^3$) and Camar (Ca^{2+} : $9.11 \pm 1.34 \text{ cmolc/dm}^3$; Mg^{2+} : $4.54 \pm 1.95 \text{ cmolc/dm}^3$), while in NCS the values are generally lower, such as $3.92 \pm 0.30 \text{ cmolc/dm}^3$ for calcium and $0.46 \pm 0.03 \text{ cmolc/dm}^3$ for magnesium in Camar. K does not present a consistent pattern, being slightly higher in the CS in some villages, such as Toconce ($1.23 \pm 0.28 \text{ cmolc/dm}^3$) and Ayquina ($1.52 \pm 1.68 \text{ cmolc/dm}^3$), but without significant differences in places such as Camar ($0.73 \pm 0.19 \text{ cmolc/dm}^3$ in the CS and $0.70 \pm 0.23 \text{ cmolc/dm}^3$ in the NCS).

3.2. Clay Mineralogy

The XRD diffraction patterns of the clay fraction indicate (Figure 4 and 5), for CS and NCS, their mineralogical composition. In all soils, the minerals recorded without previous treatment were smectite (1,332–1,385, 1,460–1,500 and 1,557 nm), illite (0.199–0.201, 0.256–0.259, 0.321–0.337, 0.335–0.408, 0.445–0.456, 0.498–0.504, 0.717–0.728 and 1,000–1,031 nm), calcite (0.187–0.192, 0.209–0.210, 0.228–0.229, 0.250, 0.304–0.306 and 0.379 – 0.389 nm), kaolinite (0.238 – 0.259, 0.336, 0.355 – 0.362, 0.446 – 0.449 and 0.717 – 0.732 nm) and feldspar/plagioclase (0.318 – 0.324 and 0.403 – 0.407 nm). The minerals identified in the clay fraction, in each village, are presented in Table 6.

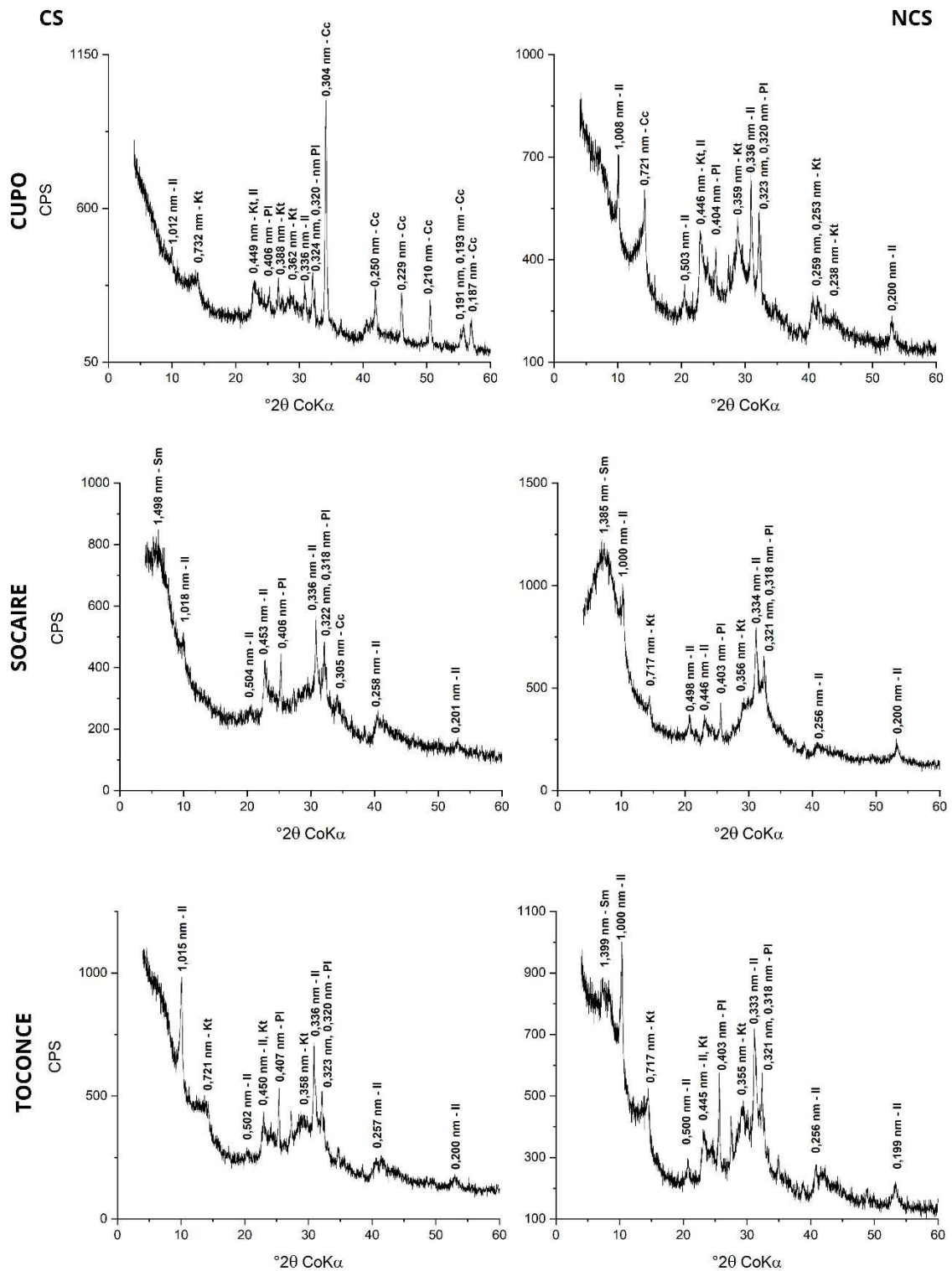
Table 6. Minerals in the clay fraction of soils at CS and NCS

Village	Smectite		Illite		Calcite		Kaolinite		Feldspar/ Plagioclase	
	CS	NC S	CS	NC S	CS	NCS	CS	NCS	CS	NCS
Ayquina		x	x	x	x	x		x		
Camar	x	x	x	x	x					x
Caspana	x	x	x	x		x			x	x
Cupo			x	x	x		x	x	x	x
Socaire	x	x			x			x	x	x
Toconce		x	x	x				x	x	x



Sm: Smectite; Il: Illite; Cc: Calcite; Kt: Kaolinite; PI: Feldspar/Plagioclase.

Figure 4. XRD of the clay fraction of CS versus NCS.



Sm: Smectite; Il: Illite; Cc: Calcite; Kt: Kaolinite; Pl: Feldspar/Plagioclase.

Figure 5. XRD of the clay fraction of CS versus NCS.

3.3. Comparison between traditionally cultivated versus natural areas of Atacama

The values for the descriptive statistics of the soils studied, grouped according to the status of cultivation or non-cultivation (CS and NCS), are shown in Table 7, and

are also graphically presented in Figures 6 and 7. The Kruskal-Wallis (KW) test showed that the comparison between CS and NCS showed statistically significant differences (Table 9) for the values of pH KCl, EC, N, Na, Ca 2+, Mg2+, t, OM, TOC, Mn, Fe, Zn, Gravel and Fine particles ($p < 0.05$).

Table 7. Median, ASD, and resistant coefficient of variation (RCV) for the parameters of CS and NCS.

Attribute	CS			NCS			p
	Median	ASD	RCV	Median	ASD	RCV	
pH H₂O	8.29	0.27	0.03	7.87	0.52	0.07	0.88
pH KCl	7.43	0.46	0.06	6.67	0.64	0.1	0.02*
EC	310.6	174.45	0.56	121.35	40.93	0.34	< 0.01*
N	1.12	0.47	0.42	0.25	0.12	0.51	< 0.01*
P	145.7	83.45	0.57	140.00	60.5	0.43	0.57
K	1.12	0.27	0.24	1.14	0.3	0.26	0.82
Na	1.16	0.41	0.36	0.30	0.15	0.51	< 0.01*
Ca²⁺	8.89	1.86	0.21	6.82	2.19	0.32	0.02*
Mg²⁺	2.77	1	0.36	1.91	1.05	0.55	0.01*
t	14.58	3.41	0.23	11.56	3.62	0.31	0.01*
OM	2.07	1.2	0.58	0.3	0.3	0.98	< 0.01*
TOC	1.5	0.87	0.58	0.22	0.21	0.98	< 0.01*
Cu	3.06	2.44	0.8	3.68	2.44	0.66	0.12
Mn	29	18.2	0.63	20.45	11	0.54	0.02*
Fe	10.55	6.05	0.57	21.1	8.7	0.41	< 0.01*
Zn	1.49	1.46	0.98	0.65	0.5	0.76	0.02*
Coarse Sand	391	83	0.213	426	85	0.199	0.67
Fine Sand	285	66	0.232	314	85	0.271	0.64
Silt	159	45	0.281	148	49	0.329	0.40
Clay	127	28	0.22	123	37	0.301	0.88
Gravel	167	48	0.29	314	110	0.351	0.01*
Fine Particles	833	48	0.058	686	110	0.161	< 0.01*

* Values bellow 0.05 meaning difference statistically significant

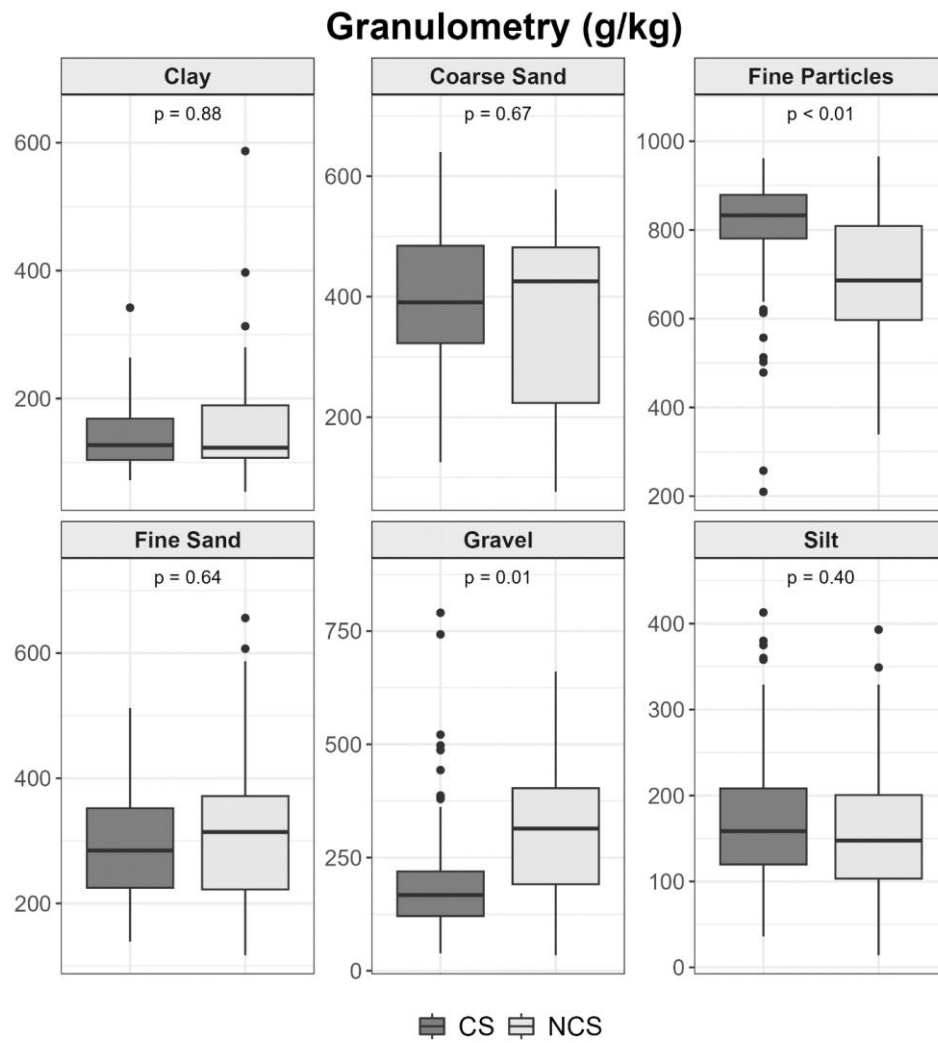


Figure 6. Granulometry boxplots.

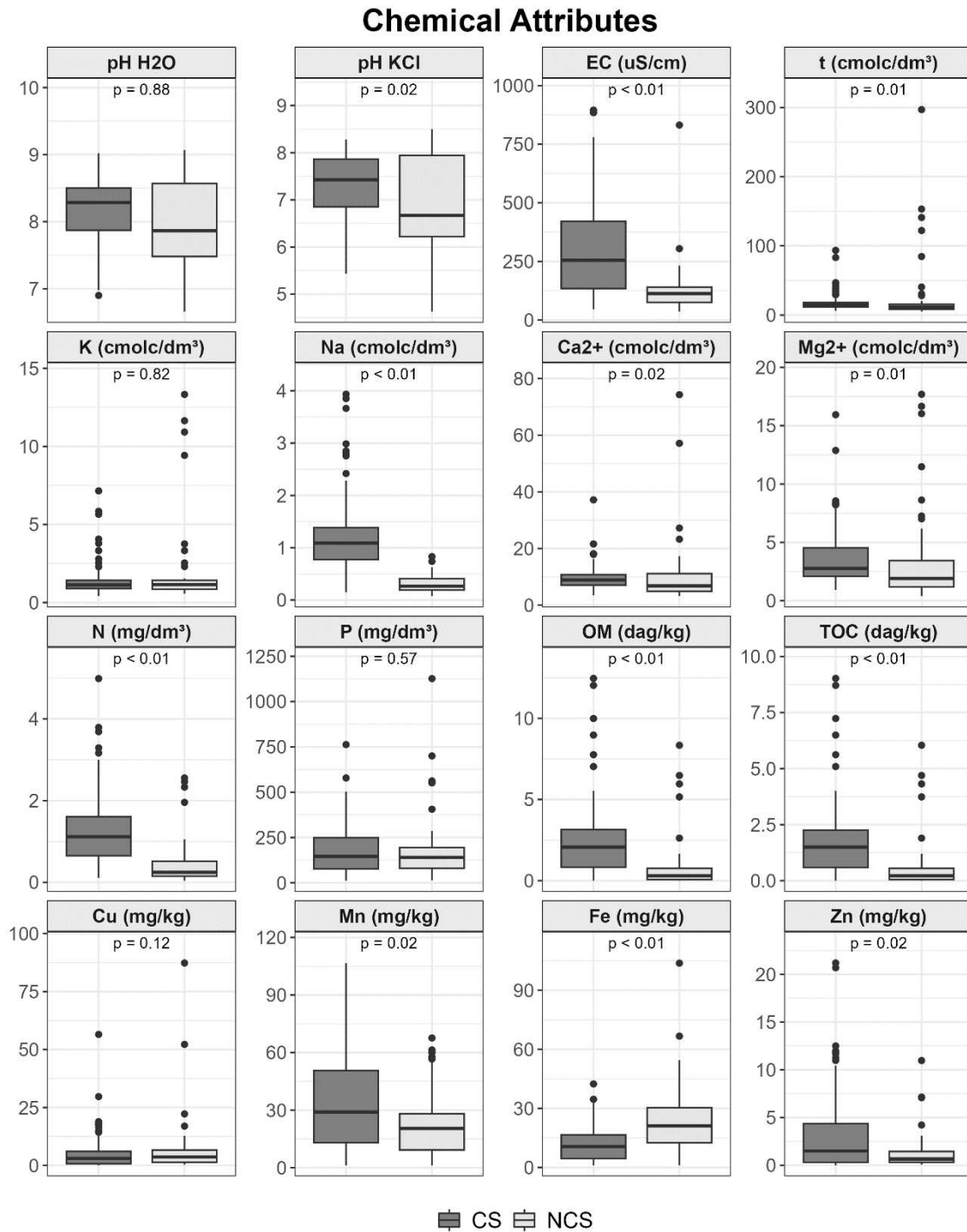


Figure 7. Comparison boxplot of the chemical attributes in the studied soils.

3.4. Granulometry

The granulometric analysis (Figure 6) revealed that the medians of the Clay, Silt and Fine Particles (size < 2 mm) contents were higher in CS, with values of 130 g/kg, 160 g/kg and 830 kg/kg, respectively. In NCS, the medians of Coarse Sand, Fine Sand and Gravel were 430 g/kg, 310 g/kg and 310 g/kg, respectively. However, statistically significant differences ($p < 0.05$) were observed only for gravel and fine particles.

3.5. Chemical Attributes

Regarding chemical attributes (Figure 7), the medians of pH (H₂O and KCl), Na, Ca, Mg, K, effective CEC (t), P, organic matter (OM), total organic carbon (TOC), N, Mn and Zn were higher in CS, due to the effect of soil cultivation and management. In contrast, NCS presented higher medians only for the micronutrients Fe and Cu. Significant differences (Table 9) between CS and NCS were observed in the following parameters: pH KCl ($p = 0.02$, 7.43), EC ($p < 0.01$, 310.60 $\mu\text{S}/\text{cm}$), Na ($p < 0.01$, 1.16 cmolc/dm^3), Ca ($p = 0.02$, 8.89 cmolc/dm^3), Mg ($p = 0.01$, 2.77 cmolc/dm^3), t ($p = 0.01$, 14.58 cmolc/dm^3), OM ($p < 0.01$, 2.07 dag/kg), TOC ($p < 0.01$, 1.50 dag/kg), N ($p < 0.01$, 1.12 mg/dm^3), Mn ($p = 0.02$, 29.00 mg/kg), Zn ($p = 0.02$, 1.49 mg/kg) and Fe ($p < 0.01$, 21.10 mg/kg in NCS).

Kendall's correlation analysis revealed significant relationships between cultivated soil parameters, with strong ($\tau > \pm 0.7$) and moderate ($\pm 0.3 \leq \tau \leq \pm 0.7$) positive correlations supported by p values well below 0.05 (Table 8). Noteworthy are the positive correlations between N, Ca and OM, pH, EC and Na, Mg and Clay and micronutrients, and the negative correlations between Gravel and Fine Particles, Coarse Sand and Silt and pH with Fe and Cu.

Table 8. Correlated parameters by Kendall Test in CS

Pair of parameters	τ	p	Correlation
N x OM	0.72	1E-37	Forte
Gravel x Fine Particles	-1.00	9E-71	Forte
pH H ₂ O x pH KCl	0.55	1E-22	Moderada
pH KCl x EC	0.51	3E-19	Moderada
pH KCl x Na	0.42	8E-14	Moderada
pH KCl x Cu	-0.40	8E-13	Moderada
pH KCl x Fe	-0.40	1E-12	Moderada
EC x Na	0.69	1E-34	Moderada
Ca ²⁺ x OM	0.41	6E-13	Moderada
Mg ²⁺ x Clay	0.44	8E-15	Moderada
Cu x Mn	0.43	2E-14	Moderada
Cu x Fe	0.55	1E-22	Moderada
Cu x Zn	0.58	2E-24	Moderada
Mn x Fe	0.48	9E-18	Moderada

Mn x Zn	0.63	6E-29	Moderada
Fe x Zn	0.52	8E-20	Moderada
Coarse Sand x Silt	-0.54	9E-22	Moderada

3.6. Anionic compounds

The anions analyzed by chromatography (Figure 8) did not present statistically significant differences between CS and NCS except for Sulfate ($p < 0.05$, 0.76 mg/L) being higher in the adjacent soils, which can be attributed to the widespread presence of gypsum crusts (CaSO_4) in most arid soils of Atacama (GJORUP, 2018). On the other hand, only Nitrate presented a higher median in CS while all the others follow higher values in NCS, indicating a reduction in reactive anions due to cultivation. In the case of nitrate, there may be a high nitrification potential in soils fertilized with animal manure, as is the case of the terraced soils studied.

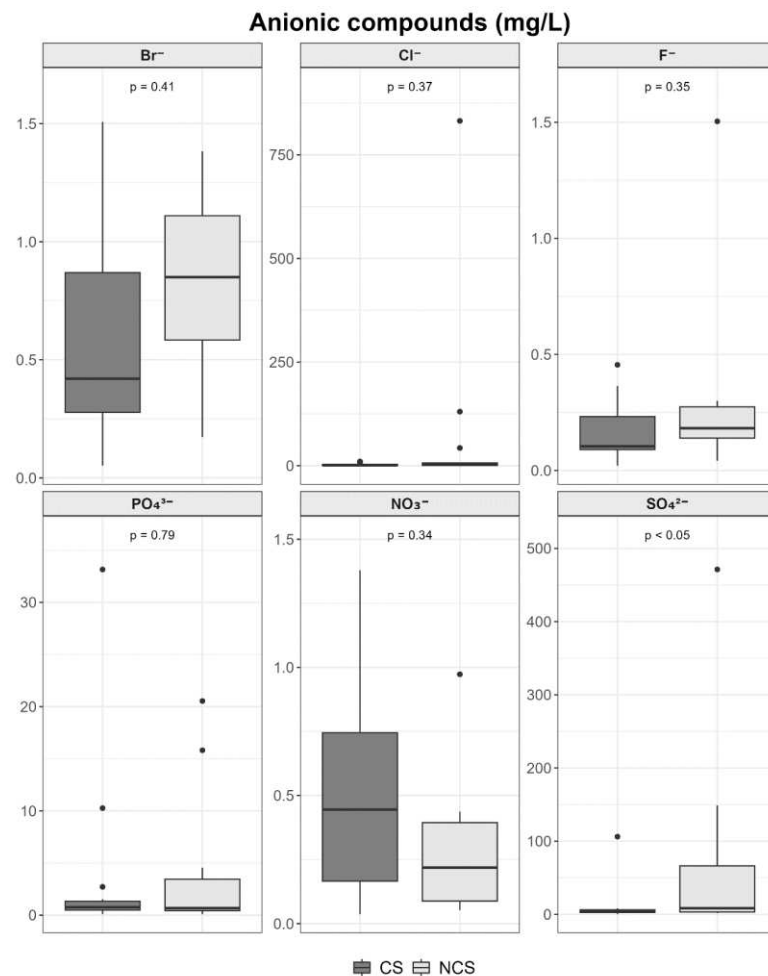


Figure 8. Boxplots of anions analyzed in chromatography method.

3.7. Total Elemental Contents

The total elemental contents analyzed by XRF are presented in Table 9. From these, the results were expressed as variation intervals between CS and NCS across the villages.

Table 9. Comparison of total elemental content (%) in CS and NCS samples from six Andean villages, determined by XRF analysis.

Villages	Element (%)	Ca	Na	K	Mg	Cl	S
Ayquina	CS	4.84	2.01	1.44	0.98	1.09	0.14
	NCS	4.78	3.17	1.10	1.11	2.20	0.63
Camar	CS	5.32	1.81	1.18	2.06	nd	0.11
	NCS	7.78	1.69	1.10	2.30	nd	0.13
Caspana	CS	3.15	1.81	1.72	0.59	nd	0.03
	NCS	2.98	1.85	1.88	0.68	nd	0.05
Cupo	CS	3.91	2.04	1.00	1.49	0.11	0.09
	NCS	3.28	1.90	1.09	1.45	nd	0.05
Socaire	CS	3.15	1.90	1.53	1.22	nd	0.03
	NCS	2.88	2.02	1.30	1.13	nd	nd
Toconce	CS	2.61	1.70	1.84	0.86	nd	nd
	NCS	2.99	1.84	1.69	0.99	nd	nd

nd: not detected

For calcium (Ca), CS present values between 2.61% in Toconce and 5.32% in Camar, while NCS varies from 2.88% in Socaire to 7.78% in Camar. Sodium (Na) contents vary from 1.7% to 2.04% in CS and from 1.69% to 3.17% in NCS, with Ayquina presenting the highest content in the NCS area. Potassium (K) oscillates between 1% and 1.84% in CS and between 1.09% and 1.88% in NCS. Magnesium (Mg) presents variation from 0.59% to 2.06% in CS and from 0.68% to 2.3% in NCS, with Camar showing the highest values in both areas.

Regarding chlorine (Cl), Camar, Caspana, Socaire, and Toconce did not present detectable contents in CS, being found only in Ayquina (1.09%) and Cupo (0.11%). In NCS, Camar, Caspana, Cupo, Socaire, and Toconce did not present chlorine contents, with detection only in Ayquina (2.2%). Sulfur (Sx) was detected in all CS of the villages, varying from 0.03% in Caspana and Socaire to 0.14% in Ayquina. In NCS, Socaire did not present detectable sulfur contents, while the remaining villages varied from 0.05% to 0.63%.

4. DISCUSSION

4.1. Poblados Atacameños: General Aspects

The Atacama villages are actively engaged in agricultural activities that play a crucial role in their lives (VILLAGRÁN; CASTRO, 2004). The main crops grown in the villages include corn, potatoes, alfalfa, quinoa, and many other annual and perennial plants. For continued cultivation, it was necessary to build a modified landscape, using terracing and soil construction techniques, an ancestral, ancient pre-Hispanic practice that has been maintained for generations.

The construction of terraces represents a significant adaptation to the unfavorable topography of the region's canyons (Figure 9). These terraces made it possible to grow and manage crops in a topographically adverse environment, and made it possible to use and manage water for irrigation. In addition to agricultural production, livestock farming is also present, with the creation and use of products and by-products from llamas, sheep, and goats. For the people, these animals have vital significance due to their wool, meat and manure (VILLAGRÁN; CASTRO, 2004).



Figure 9. Traditional Atacameno agricultural on bench and sloping terraces. 1) Toconce valley; 2) Caspana valley; 3) Socaire sloping fields; 4) Camar sloping fields; 5) Ayquina Valley; 6) Cupo bench and sloping terrace fields.

Here, we highlight the village of Ayquina, which appears to stand out from the others by presenting potentially higher and distinct values, particularly with respect to EC. Ayquina, Caspana and Toconce have the same lithology of Ignimbrites and tuffs, but the elevated EC levels observed in Ayquina's NCS may be influenced by its proximity to the Salado River, a naturally brackish watercourse that is affected by flows originating from the Tatio springs (GONZÁLEZ-PIZARRO, 2000). This particular saline water source may provide a continuous influx of dissolved salts, potentially infiltrating the surrounding pedosphere via both surface and subsurface pathways. Such dynamics may help explain the contrast between Ayquina and the other villages, that do not have direct exposure to similar water quality. Observations from local residents support the notion that the river's high salinity might be a contributing factor to the saline conditions found in nearby soils.

The extreme aridity of the Atacama Desert intensifies salt concentration through pronounced evapotranspiration processes, where capillary rise of saline groundwater is followed by rapid evaporation, leaving concentrated salt deposits in the soil matrix. This hyperarid environment creates ideal conditions for evaporite mineral precipitation, including halite, gypsum, and other soluble salts (GJORUP, 2018).

Moreover, Ayquina's topographical position, being the lowest in elevation (3026 ± 28 m a.s.l.) among the four Alto El Loa settlements, may also play a role in this pattern. The Salado River canyon may act as a natural trap, allowing wind-driven particles, carrying evaporite minerals and salt-enriched materials from surrounding salt flats and evaporitic deposits, to settle and contribute to additional salt inputs to the soil system. The substantial difference in EC between CS and NCS indicates that agricultural management may provide some salinity control that will be further discussed.

4.2. Granulometry and morphology

The granulometric analysis (Figure 6) reveals that cultivated soils (CS) have a higher fine particle content with statistical differences within and between villages. This distinction, combined with the lower gravel content in CS, suggests a deliberate and cumulative process of selecting materials for better soil conditioning, as reported by

Gálvez (1984) in Peruvian communities in the Andean Puna regions. Such practices contributed to the development of improvements in the physical properties of these agricultural soils, a critical factor for maintaining productivity in desert environments. This intentional manipulation of soil composition demonstrates the sophisticated agricultural knowledge and advanced techniques employed by pre-hispanic Andean societies. Kendall's statistical test also shows that there are inverse correlations between fine particle content with gravel and coarse sand with silt, which corroborate this selection.

In other regions of the Atacama Desert in Chile, Sandor et al. (2022) documented a similar pattern of soil modification. His analysis of natural soils and terraced soils revealed a distinct textural change associated with agricultural management, especially a reduction in sand content in managed soils. This finding corroborates the trends in soil physical modification observed in the present study.

However, other constructed Anthrosols in different parts of the world present diverse grain size characteristics. For example, Silva and Silva et al. (2024) observed a wide textural variation in the Archaeological Black Earths, ranging from sandy to clayey compositions. Similarly, Zhao et al. (2023) compared Anthrosols in China with other soil types, highlighting significant textural variability. This diversity can be attributed to differences in construction methods and management practices applied to the soils, which ultimately shape their distinct physical properties. Among these, the use of sieves to fill terraces with finer soil materials was documented in the field through farmers' testimonies. Such variability highlights the influence of local agricultural techniques combined with specific environmental conditions on the development of Anthrosols.

The intentional separation of gravel from the soil, resulting in a terrace with finer particles, favors a physically more suitable and favorable environment for plant growth. This textural modification improves water retention by increasing the proportion of clay and silt in relation to sandy (and gravelly) components, an aspect particularly critical in arid environments. In addition, the better developed soil structure favors root development and nutrient uptake. These benefits are widely documented in studies analyzing the effects of incorporating fine particles in sandy soils of arid regions, such as those carried out by Alghamdi et al. (2023), Hong et al. (2024) and Yang et al. (2022). The intentional alteration of soil composition, resulting in these improvements,

can be described as the development of “physical fertility”, an essential factor for maintaining agricultural productivity in challenging environments.

The increase in clay in some villages may also be associated with the addition of organic matter, the advancement of pedogenesis through irrigation management, or the systematic process of textural selection carried out by farmers. Thus, the association of these soil management practices over time aligned with the expression of pedogenesis on terraces may influence these higher values.

The incorporation of organic matter reduces soil bulk density by increasing its pore space. This is demonstrated in the study by Rayne and Aula (2020), which highlights various changes in the physical properties of the soil, including improvements in structure, water retention, and temperature regulation, in addition to the aforementioned reduction in bulk density. These findings align with the fact that incorporating organic matter can increase the clay content in these soils through the addition of particles that are even finer decreasing bulk density. This process occurs systematically as organic matter is incorporated, even during the construction of terraces.

The morphology of the soils presents more yellowish and dark colors, with weak structure, from small to very small size subangular blocks in the CS, and single grain and weak structure in the NCS. The colors are related to the input of organic matter and the structure can be attributed to the predominantly sandy texture of the soils, with the differentiation being attributed to this addition.

4.3. Chemical attributes

The natural soils of the Atacama Desert, as observed by Gjorup et al. (2019) and Sandor et al. (2022) in regions with characteristics similar to those of the present study, present lower pH values than those identified in the CS. This same pattern extends for other parameters analyzed, such as available phosphorus (P), potassium (K), sodium (Na), calcium (Ca), magnesium (Mg) and organic matter OM. However, Sandor et al. (2022) record higher electrical conductivity (EC) values than those found in this study. Thus, while pH, P, K, Na, Ca, Mg and OM demonstrate higher concentrations compared to the natural soils reported by other authors, EC is at lower levels (Table 10), indicating that irrigation management can control salinity at a level acceptable for cultivation which will be further discussed in the following section.

Regarding Organic Matter contents, the results of cultivated bench terrace show much greater figures than reference soils from the literature (table 10, references therein). In this respect, Alavi-Murillo et al. (2022) states that OM in the high Andes is largely conserved by the region's low prevailing temperatures, but potentially endangered by global warming; these authors suggest that traditional soil management by indigenous peoples (fallow, crop rotation, irrigation, bench terraces) have positive impacts on OM concentration, despite limited available data and some contradictory results. Our study strongly supports this view.

Table 10. Comparison of soil attributes from other studies

Attribute	Gjorup et al. (2019)	Sandor et al. (2022)	CS (present study)
pH H ₂ O	4.65 – 5.81	6.90 – 7.60	8.29
EC (uS/cm)		210 – 720	310
N (mg/dm ³)		4.00 – 9.30	1.12
P (mg/dm ³)	41.50 – 245.60	4.70 – 17.70	145.70
K (cmolc/dm ³)	0.05 – 0.49		1.12
Na (cmolc/dm ³)	0.04 – 0.13		1.16
Mg (cmolc/dm ³)	0.01 – 0.93		2.77
OM (g/kg)	0.13 – 0.77	3.10– 5.58	14.58

The concentrations of exchangeable K, Na, Ca and Mg (Figure 7) reveal an increase in the base contents in the CS, in addition to statistically significant differences, according to the KW test, in the Na, Ca and Mg contents between the CS and NCS. In addition, the Kendall test positively correlates pH, EC and cations, corroborating the process of chemical alteration of the soils by irrigation. This phenomenon can be attributed to the use of water produced by the periodic thaw of snow from Andean highlands in irrigation, which carries these cations to the managed soils.

The arid condition plays a crucial role in these dynamics, due to the high evapotranspiration rates that favor the capillary rise of the soil solution. As a consequence, the ions tend to accumulate in the most superficial layers, instead of being leached, intensifying the alkalization processes in the irrigated soils, but without causing salinization problems, since water is permanently used. All the villages except Ayquina follow this accumulation pattern. This may occur due to the granulometry of the village's CS, which differs from the observed selection patterns (see previous topic), and leaching may be more efficient.

The highest pH and effective CEC (t) values were observed in the CS, differing statistically from the values recorded in the NCS. The more alkaline pH can be explained by the higher concentration of bases, especially Ca and Na, retained in the

CEC of the fine fraction of the soil. This phenomenon can trigger a pH stabilization process associated with management, as documented in other studies on Anthrosols (ASARE, 2022; CHUPINA, 2020). However, while in other contexts this process can result in maintenance of pH around neutrality, in the present study it manifests itself predominantly as an alkalizing factor with values always higher in CS compared to NCS and in agreement with what was observed by Gjorup et al. (2019) and Sandor et al. (2022) in natural desert soils.

The electrical conductivity (EC) follows the same trend, presenting higher values in CS. This increase is directly related to the accumulation of soluble salts promoted by the intense evapotranspiration characteristic of the arid environment. The accumulation of salts from irrigation is evidenced by the presence of saline crusts at the base of terraces and in water channels (Figure 10). The salinization of irrigated soils in desert environments has been widely documented in the literature, with studies such as those by Cox et al. (2018), in Texas, and Li et al. (2009), in China, highlighting this process in different regions of the world.

The organic matter (OM) and nitrogen (N) contents showed statistically significant differences between the medians of studied soils (Figure 7), with a positive correlation between N and OM. Among the villages, only Ayquina presents lower values of these attributes in the CS, and all the other villages show clear enrichment of OM and N in the CS in relation to the NCS.

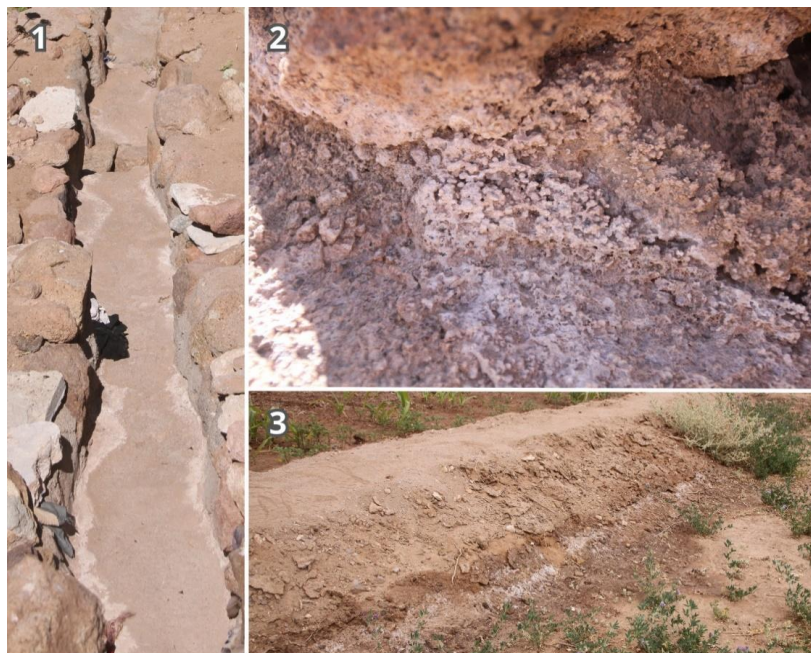


Figure 10 Carbonate crusts; 1) Irrigation canal with crusts; 2) A closer look to the crust on the canal; 3) Crust in a terrace base.

Organic fertilizers derived from animal manure present a relatively rapid mineralization, ensuring the continuous availability of nutrients and the maintenance of the cation exchange capacity necessary for plants' absorption (LEHMANN et al., 2003). In arid environments, where soils often have high salt contents and low fertility, the addition of animal manure plays a fundamental role in complexing and transforming previously insoluble elements as essential nutrients (RESÉNDIZ-PAZ et al., 2013).

In this respect, Rayne and Aula (2020) highlight that the application of animal manure contributes to the increase of soil organic matter and reduces its long-term degradation. In addition, animal waste contains significant levels of N, P, K, among other nutrients, giving the soil greater buffering capacity. Thus, the use of manure as fertilizer not only improves soil fertility, but also contributes to its long-term chemical and physical stability. The OM and N contents in the CS reflect this behavior well, considering that soil fertility management is solely and exclusively done through animal manure, varying in source (llamas, sheep, goats and other animals) from village to village.

The cumulative process of manure addition highlights its importance in the anthrosolization process in these soils, and is a key aspect of agricultural management to increase the availability of macro and micronutrients (notably Cu, Fe, Zn) with organic fertilization (ARENS et al., 2021; HAO et al., 2020).

The available phosphorus values did not show statistically significant differences between CS and NCS, with comparable medians. Therefore, the regional P background appears to be naturally high. In the case of the Atacama Desert, the communities have a strong association with current volcanoes, which are active and frequently expel ash rich in apatite. Only a more in-depth study can clarify the source of P in the soils of the region, which have great lithological diversity and the presence of unconsolidated sediments (e.g. (ARENS et al., 2021; SERNAGEOMIN, 2003; TAPIA et al., 2018).

Phosphorus is a key element in Anthrosols, as demonstrated by several studies. Schaefer et al. (2004), Lima et al. (2002) and Arroyo-Kalin et al. (2009) highlighted its relevance in the Archaeological Black Earths, while Vasilchenko and Vasilchenko (2024), Tóth et al. (2008) and Chupina (2020) pointed out its importance in Plaggic and

Terric Anthrosols. However, this criterion does not apply well to the traditionally cultivated soils analyzed in this study, suggesting that phosphorus dynamics may be conditioned by specific local factors. Among these factors, the mineralogical composition of the soil, the nutrient fixation processes and the use of organic fertilizers with relatively low phosphorus contents stand out.

4.4. Anionic compounds and total elemental contents

With all these results, the following question arises: why does traditional agricultural management in these soils not result in complete salinization of the CSs? Data on EC and nutrient levels indicate a progressive accumulation of salts and a potential salinization process, especially considering the climatic conditions and management practices adopted. However, the anion levels of the salts are generally slightly higher in the NCSs, with a statistically significant difference only for sulfate (SO_4). Thus, anthrosolization in the constructed soils of the terraces does not lead to salinization, and allows cultivation in these environments to be sustainable and productive. The use of irrigation water, with the correct management of frequency and volumes, as well as constant harvests, which export soluble elements, should play an important role in the process.

Irrigation of agricultural terraces occurs through intermittent flooding, using water from the seasonal melting of snow from the high Andes mountains, upslope. This water is mainly made available to the villages through artificial canals at level, running along the sides of the foothills, redistributed in smaller canals to the terraces. During this route, different elements could be carried, influencing the chemical composition of the water used for irrigation.

After reaching the terraces, the water flows through channels and is successively distributed to the cultivated areas, through descending channels, terrace by terrace (MADALENO, 2012). This continuous irrigation process not only ensures water availability, but also promotes the progressive addition of dissolved compounds to the soil. Over time, this practice influences its chemical properties, which can lead to changes in fertility and nutrient dynamics (COX et al., 2018).

Several studies indicate the presence of dissolved ions in meltwater, such as sodium (Na), calcium (Ca), magnesium (Mg), sulfate (SO_4), carbonate (CO_3), and others, in addition to changes in EC and pH. This presence has been documented in different regions of the Andes, including Chile (IGNATOV; VALCHEVA, 2023;

POURRIER Et Al., 2014; SANDOR Et Al., 2022), the Peruvian Andes (MARK; MCKENZIE; GÓMEZ, 2005), and the Argentine portion of the mountain range (LECOMTE et al., 2008).

Although irrigation practices in arid environments are commonly associated with salt accumulation and consequent soil salinization (FERNÁNDEZ CIRELLI ET AL., 2009), the total elemental contents reveal a more complex pattern, indicating effective control of salinization in CS. The analysis of salinity-indicating elements, particularly Na and Cl, demonstrates that Na remains consistently controlled in CS relative to NCS, while Cl is either absent or detected only in residual amounts. This results from the high ionic mobility of these elements in aqueous solution: Na^+ and Cl^- , due to their lower hydration energy and weak affinity for clay exchange sites, which may cause them to be leached during irrigation cycles (GHAFOOR, 1999).

Therefore, the high EC values, without leading to harmful salinization, originate from other sources. The primary mechanism explaining the protection against salinization lies in the cationic competition for clay exchange sites, particularly those of smectite and illite identified in the mineral fraction. The lyotropic series (ALLEONI; MELLO; ROCHA, 2019) governs this competition, where divalent cations such as Ca^{2+} and Mg^{2+} have greater affinity for exchange sites compared to monovalent Na^+ .

Calcium emerges as the most effective cation in this competition due to its higher charge density and smaller hydrated ionic radius, and, as confirmed by the results, higher total content than sodium. Magnesium may complement calcium's action in stabilizing the exchange complex, contributing to the maintenance of soil structure and reducing the availability of exchange sites for sodium adsorption. Potassium, although monovalent, can play an important role in cationic competition due to its specific selectivity for the interlayer spaces of illite, demonstrating the capacity to occupy preferential sites that reduce sodium saturation (VETTERLEIN ET AL., 2013).

The differentiated t between CS and NCS represents an additional factor explaining the absence of damaging salinization. The higher t in managed soils reflects an enhanced capacity to retain Ca^{2+} , Mg^{2+} , and K^+ in the exchange complex, resulting in greater resistance to sodium saturation. The presence of 2:1 clay minerals such as smectite, and calcite as a secondary mineral, provides both exchange sites and a continuous calcium source to maintain a favorable cationic balance.

All this leads us to the specific composition of irrigation water originating from the Andes supporting a protective system against salinization. Carbonates from glacial meltwater continuously supply Ca^{2+} and Mg^{2+} to the soil system, while sulfates can form complexes that enhance sodium leaching or contribute to the precipitation of minerals such as gypsum as saw by Gjorup (2018). This continuous input of calcium and magnesium through irrigation sustains the competitive pressure against sodium, preventing its accumulation even under the high evapotranspiration rates typical of arid environments (RIBEIRO; BARROS; FREIRE, 2019; VARGAS ET AL., 2018).

Flood irrigation adopted in the cultivated areas may also favor the desalinization of soils. Terraces are built on elevated sectors of the landscape, facilitating natural drainage and runoff of excess water. Thus, irrigation not only ensures the moisture required for crop development but also contributes to the leaching of accumulated salts. The very design of the terraces enhances this leaching dynamic. Nevertheless, salt crusts often form along irrigation channels and at the base of the terraces due to concentrated evaporation. Even so, these deposits are spatially limited and do not compromise the overall salinity status of the cultivated soils, which remain free from harmful salinization.

The leaching process may also be influenced by the granulometric characteristics of the constructed soils. Although there is a systematic selection of finer materials during the formation of the CSs, sand remains a predominant component, promoting high infiltration rates and facilitating the downward movement of soluble ions that would otherwise accumulate within the soil profile. This observation aligns with findings in the literature (BRUINS, 2012; PUY et al., 2018; SANDOR; GERSPER; HAWLEY, 1990) and converges with the idea that the soils are constructed with materials of the desired granulometry.

Also, the villages of the Atacama Desert have a strong agricultural tradition, growing several varieties of quinoa, corn and potatoes as staple foods. Furthermore, alfalfa is widely used for livestock feed, while corn is grown for both human consumption and animal feed (ROMO et al., 1999). With more than 3,000 years of selection and improvement, it is likely that the adopted cultivars have good tolerance to salinity, with the capacity or ability to absorb salts from the soil (ADOLF; JACOBSEN; SHABALA, 2013; SAHAI, 2003; SILVA et al., 2023). Absorption and export by plants must be one of the factors that prevents the complete salinization of CS. In addition,

the practice of crop rotation, involving the sequential cultivation of different plant species throughout the growing cycle, may contribute to nutrient and salt export, given the distinct uptake capacities and nutritional demands of each crop.

Andean agriculture is known for the use of native seeds, selected and transmitted over generations by local communities, which are highly adapted to adverse environmental conditions (DENEVAN, 2001; GONZALES, 2000; JACOBSEN; MUJICA; ORTIZ, 2003; RAYNE; AULA, 2020). The influence of these traditional cultivars on soil conditions may be reflected in some of the differences observed between CS and NCS, such as the absence of statistically significant variation in potassium (K) levels and the lower presence of other salts in cultivated soils. The cultivation of salt-tolerant and -absorbing plants has been a fundamental strategy adopted by traditional communities to mitigate the effects of salinity on agricultural soils, as demonstrated in the study by Diedhiou et al. (2021) on the use of corn from native seeds under saline stress conditions and Silva et al. (2023) with native alfalfa.

4.5. Mineralogy

The mineralogy of the clay fraction remains predominantly composed of 2:1 minerals, such as illite and smectite, and 1:1, such as kaolinite, in addition to primary minerals, such as feldspar/plagioclase and calcite, the latter of which may be of primary or secondary origin. This is consistent with previous work by Gjorup (GJORUP et al., 2019).

Among Camar, Cupo and Socaire, only CS have the presence of calcite, which may be related to irrigation and secondary carbonate formation, as reported by Levy (1980) with calcite-saturated waters. This corroborates the addition of carbonates, which favor the precipitation of this mineral in conditions of high evapotranspiration (DONER; LYNN, 1989). In NCS, calcite may be associated with the parent material, indicating a young soil, as in the case of Ayquina (present in CS and NCS) and Caspana, thus being a primary mineral that can be easily weathered (RAI; KITTRICK, 1989). The absence of calcite in the Caspana CS may be in line with chemical weathering caused by drainage that can occur on the terraces due to the sandy texture.

In the villages of Ayquina, Socaire and Toconce, kaolinite is observed in NCS, possibly due to the glacial weathering of pre-weathered rocks that have kaolinite in their composition. This was confirmed by Sharma et al. (2021) in their study on high

mountain glaciers. Kaolinite was also founded in Cupo's CS, that may represent the construction process, that utilizes material from nearby soils with the same mineral characteristics.

The presence of feldspar/plagioclase is widespread in the clay fraction of all villages, both in CS and NCS, with the exception of Camar. Feldspars in the clay fraction are commonly found in poorly weathered, young soils, where hydrolysis is limited, and indicate good mineral reserves, as they are present in the finest fraction of the soils (RESENDE et al., 2019).

The presence of smectite in Camar, Caspana and Socaire may be associated with the high Ca and Mg contents, greater soil moisture and the alkaline pH, factors that favor its formation and stability. The absence of smectite in Cupo may be related to the local lithology of glacial deposits and scree-slopes of recent volcanic ash. In the CS of Ayquina and Toconce, illite is founded alongside. In fact, illite is found in almost all the villages, being absent only in Socaire. This may be related to the local lithology, characterized by being a pyroclastic flow deposit of basaltic origin that suggests a presence of iron and reduced availability of potassium, favoring the presence of smectite (BORCHARDT, 1989).

5. CONCLUSIONS

1. This study of constructed, cultivated soils on terraces in the Atacama Desert is a pioneer in revealing the main physical and chemical characteristics of these anthropic soils and their differentiation in relation to natural soils in the vicinity area.

2. Anthrosolization pathways: Soil construction and management by traditional peoples involves three processes: (i) terrace construction using selected natural soil materials; (ii) irrigation management; and (iii) addition of animal manure and fertilizers (e.g., guano).

3. Terrace construction: Stone containment and material separation created cultivable soils through selective removal of large gravels and concentration of finer particles. This textural differentiation improves agricultural conditions but creates significant vertical and lateral variability.

4. Irrigation effects: Water from Andean snowmelt introduces soluble elements, increasing Na, Ca, Mg levels and pH without harmful salinization. This creates a complex chemical regulation system where natural and anthropogenic factors maintain

ionic balance and soil functionality, also altering clay mineralogy and promoting secondary carbonate precipitation.

5. Organic matter addition: Animal manure increases organic matter and nitrogen in anthropic soils. However, phosphorus levels do not differ significantly between cultivated and uncultivated soils, suggesting minimal impact from manure addition on P availability, unlike other global Anthrosol contexts. Further studies are needed to elucidate P sources in Atacama's arid soils.

6. Broader significance: Atacama Anthrosols represent valuable archaeological, cultural, agronomic and technological information. Their mineralogical diversity and heterogeneous geochemistry offer lessons for designing resilient systems that can inspire sustainable, long-term productivity under increasing water scarcity, low organic matter soils, and adverse climatic conditions.

6. REFERENCES

ADOLF, VI.; JACOBSEN, S-E.; SHABALA, S. Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Environmental and Experimental Botany**, v. 92, p. 43-54, 2013. doi: 10.1016/j.envexpbot.2012.07.004.

ALAVI-MURILLO, G. et al. Soil organic carbon in Andean high-mountain ecosystems: importance, challenges, and opportunities for carbon sequestration. **Regional Environmental Change**, v. 22, n. 128, 2022. doi: 10.1007/s10113-022-01980-6.

ALLEONI, L. R. F.; MELLO, J. W. V.; ROCHA, W. S. D. da. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. In: MELO, Vander de Freitas; ALLEONI, Luis Reynaldo Ferracciu (Orgs.). **Química e mineralogia do solo**. 1a ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 765–826.

ALGHAMDI, A. G.; MAJRASHI, M. A.; IBRAHIM, H. M. Improving the Physical Properties and Water Retention of Sandy Soils by the Synergistic Utilization of Natural Clay Deposits and Wheat Straw. **Sustainability**, v. 16, n. 1, p. 46, 2023.

ARENS, F. L. et al. Geochemical proxies for water-soil interactions in the hyperarid Atacama Desert, Chile. **Catena**, v. 206, 105531, 2021. doi: 10.1016/j.catena.2021.105531.

ARROYO-KALIN, M.; NEVES, E.; WOODS, W. Anthropogenic Dark Earths of the Central Amazon Region: Remarks on Their Evolution and Polygenetic Composition. In: **Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. p. 99-125. doi: 10.1007/978-1-4020-9031-8_5.

ASARE, M. O. Anthropogenic dark earth: Evolution, distribution, physical, and chemical properties. **European Journal of Soil Science**, v. 73, 2022. doi: 10.1111/ejss.13308.

BORCHARDT, G. Smectites. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in Soil Environments**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 675-727. doi: 10.2136/sssabookser1.2ed.c14.

BRUINS, H. J. Ancient desert agriculture in the Negev and climate-zone boundary changes during average, wet and drought years. **Journal of Arid Environments**, v. 86, p. 28-42, 2012. doi: 10.1016/j.jaridenv.2012.01.015.

CHEN, P. Y. **Table of key-lines in X-ray powder diffraction patterns of minerals in clay and associated rocks**. Bloomington: Geological Survey Occasional Paper, n. 21, 1977.

CHUPINA, V. I. Anthropogenic Soils of Botanical Gardens: A Review. **Eurasian Soil Science**, v. 53, p. 523-33, 2020. doi: 10.1134/S1064229320040043.

CLARKE, J. D. A. Antiquity of aridity in the Chilean Atacama Desert. **Geomorphology**, v. 73, p. 101-14, 2006. doi: 10.1016/J.GEOMORPH.2005.06.008.

COX, C. et al. Soil quality changes due to flood irrigation in agricultural fields along the Rio Grande in western Texas. **Applied Geochemistry**, v. 90, p. 87-100, 2018. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.12.019.

DE LA VEGA, G. **Comentarios reales de los Incas** [1609]. Lima: Editorial Fondo de Cultura Económica, 1991.

DENEVAN, W. M. **Cultivated landscapes of native Amazonia and the Andes**. Oxford: Oxford University Press, 2001.

DIEDHIOU, I. et al. Effects of different temperatures and water stress on germination and initial growth of creole genotypes of maize from three different agroclimatic regions of San Luis Potosí (México). **Maydica**, 2021.

DONER, H. E.; LYNN, W. C. Carbonate, Halide, Sulfate, and Sulfide Minerals. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in Soil Environments**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 279-330. doi: 10.2136/sssabookser1.2ed.c6.

FERNÁNDEZ-CIRELLI, Alicia; ARUMÍ, José Luis; RIVERA, Diego; BOOCHS, Peter W. Environmental effects of irrigation in arid and semi-arid regions. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 69, n. Supl. 1, p. 27-40, dez. 2009.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.

FUENTES, B. et al. Influence of Physical-Chemical Soil Parameters on Microbiota Composition and Diversity in a Deep Hyperarid Core of the Atacama Desert. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, 2022. doi: 10.3389/fmicb.2021.794743.

GÁLVEZ, M. Los horticultores de Pucara. **Revista Peruana de Ciencia y Tecnología Campesina**, v. 14, p. 3-23, 1984.

GHAFOOR, Abdul. Concentration of Ca²⁺ in irrigation water for reclaiming saline-sodic soils. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 36, p. 145-148, 1 jan. 1999.

GJORUP, D. F. **Gênese e mineralogia de solos no gradiente climático árido-hiperárido no Deserto do Atacama, Norte do Chile**. 2018. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

GJORUP, D. F. et al. Pedoclimate monitoring in the periglacial high mountain soils of the Atacama Desert, northern Chile. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 30, p. 310-29, 2019. doi: 10.1002/ppp.2029.

GONZALES, T. A. The Cultures of the Seed in the Peruvian Andes. In: **Genes in the Field: On-farm Conservation of Crop Diversity**. Ottawa: International Development Research Centre, 2000.

González-Pizarro JA. La salinidad de las aguas continentales y los proyectos hidráulicos en la región de Antofagasta a fines del siglo XIX y primeras décadas del siglo XX. **Revista de Derecho Administrativo Económico**. 2000:401-11. doi: 10.7764/redae.6.15.

GONZÁLEZ-PIZARRO, J. A.; GALENO-IBACETA, C. Natural and Cultural Landscapes in Atacama Desert: Between Tradition and Innovation. In: **Landscape Architecture - The Sense of Places, Models and Applications**. InTech, 2018. doi: 10.5772/intechopen.72091.

GOODMAN-ELGAR, M. Evaluating soil resilience in long-term cultivation: a study of pre-Columbian terraces from the Paca Valley, Peru. **Journal of Archaeological Science**, v. 35, p. 3072-86, 2008. doi: 10.1016/j.jas.2008.06.003.

GRABER, C. **Farming Like the Incas**. Smithsonian Magazine, 2011.

HAO, X. et al. Enhancement of no-tillage, crop straw return and manure application on field organic matter content overweigh the adverse effects of climate change in the arid and semi-arid Northwest China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 295, 108199, 2020. doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108199.

HARTLEY, A. J.; CHONG, G. Late Pliocene age for the Atacama Desert: Implications for the desertification of western South America. **Geology**, v. 30, p. 43, 2002. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0043:LPAFTA>2.0.CO;2.

HARTLEY, A. J. et al. 150 million years of climatic stability: evidence from the Atacama Desert, northern Chile. **Journal of the Geological Society**, v. 162, p. 421-4, 2005. doi: 10.1144/0016-764904-071.

HONG, Z.; ZHAO, W.; SUN, C. Impact of textural layers in soils on irrigation infiltration processes in an oasis farmland, northwestern China. **Soil Use and Management**, v. 40, n. 4, 2024.

IGNATOV, I.; VALCHEVA, N. Physicochemical, isotopic, spectral, and microbiological analyses of water from glacier mappá, Chilean Andes. **Journal of the Chilean Chemical Society**, v. 68, p. 5802-6, 2023. doi: 10.4067/S0717-97072023000105802.

IUSS WORKING GROUP WRB. **World Reference Base for Soil Resources: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. 4. ed. Vienna: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022.

JACOBSEN, S. E.; MUJICA, A.; ORTIZ, R. The global potential for quinoa and other Andean crops. **Food Reviews International**, v. 19, p. 139-48, 2003.

LECOMTE, K. L. et al. Hydrochemical appraisal of ice- and rock-glacier meltwater in the hyperarid Agua Negra drainage basin, Andes of Argentina. **Hydrological Processes**, v. 22, p. 2180-95, 2008. doi: 10.1002/hyp.6816.

LEHMANN, J. et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, p. 343-57, 2003. doi: 10.1023/A:1022833116184.

LEVY, R. Precipitation of carbonates in soils in contact with waters undersaturated or oversaturated in respect to calcite. **Journal of Soil Science**, v. 31, p. 41-51, 1980. doi: 10.1111/j.1365-2389.1980.tb02063.x.

LI, X. G. et al. Changes in soil organic carbon, nutrients and aggregation after conversion of native desert soil into irrigated arable land. **Soil and Tillage Research**, v. 104, p. 263-9, 2009. doi: 10.1016/j.still.2009.03.002.

LIMA, H. N. et al. Pedogenesis and pre-Colombian land use of "Terra Preta Anthrosols" ("Indian black earth") of Western Amazonia. **Geoderma**, v. 110, p. 1-17, 2002. doi: 10.1016/S0016-7061(02)00141-6.

MADALENO, I. M. Desertificação no Norte do Chile. **Finisterra**, v. 42, 2012. doi: 10.18055/Finis1441.

MARK, B. G.; MCKENZIE, J. M.; GÓMEZ, J. Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejon de Huaylas, Peru / Evaluation hydrochimique de la contribution évolutive de la fonte glaciaire à l'écoulement fluvial: Callejon de Huaylas, Pérou. **Hydrological Sciences Journal**, v. 50, 2005. doi: 10.1623/hysj.2005.50.6.975.

MICROSOFT CORPORATION. **Excel (Microsoft 365 Subscription)**. [Software]. Microsoft Corporation, 2025.

NEAL, J.; HAWKER, L. **FABDEM V1-2**. 2023. doi: 10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn.

PARCERO-OUBIÑA, C. et al. Ground to air and back again: Archaeological prospection to characterize prehispanic agricultural practices in the high-altitude Atacama (Chile). **Quaternary International**, v. 435, p. 98-113, 2017. doi: 10.1016/J.QUAINT.2015.12.050.

POURRIER, J. et al. Glacier meltwater flow paths and storage in a geomorphologically complex glacial foreland: The case of the Tapado glacier, dry Andes of Chile (30°S). **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1068-83, 2014. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.023.

PUY, A. et al. Detection of sand encroachment patterns in desert oases. The case of Erg Chebbi (Morocco). **Science of The Total Environment**, v. 642, p. 241-9, 2018. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.343.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023.

RAI, D.; KITTRICK, J. A. Mineral Equilibria and the Soil System. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in Soil Environments**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 161-98. doi: 10.2136/sssabookser1.2ed.c4.

RAYMENT, G. E.; LYONS, D. J. **Soil chemical analysis methods**: Australia. Collingwood: CSIRO Publishing, 2011.

RAYNE, N.; AULA, L. Livestock Manure and the Impacts on Soil Health: A Review. **Soil Systems**, v. 4, n. 64, 2020. doi: 10.3390/soilsystems4040064.

RESENDE, M. et al. **Da Rocha ao Solo: enfoque ambiental**. Lavras: Editora UFLA, 2019.

RESÉNDIZ-PAZ, M. L. et al. Local soil knowledge and management of Anthrosols: A case study in Teoloyucan, Mexico. **Geoderma**, v. 193-194, p. 41-51, 2013. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.09.004.

RIBEIRO, M. R.; BARROS, M. de F. C.; FREIRE, M. B. G. dos S. Química dos solos salinos e sódicos. In: MELO, Vander de Freitas; ALLEONI, Luis Reynaldo Ferracciu (Orgs.). **Química e mineralogia do solo**. 1a ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 1146–1176.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and Improvement of United States Salinity Laboratory Staff**. 1954.

ROMO, M. et al. La Transición Entre Las Tradiciones De Los Oasis Del Desierto Y De Las Quebradas Altas Del Loa Superior: Etnobotánica Del Valle Del Río Grande, 2a Región, Chile. **Chungará (Arica)**, v. 31, 1999. doi: 10.4067/S0717-73561999000100006.

SAHAI, S. Importance of indigenous knowledge. **Indian Journal of Traditional Knowledge**, v. 2, p. 14, 2003.

SAIANO, F.; SCALENGHE, R. An anthropic soil transformation fingerprinted by REY patterns. **Journal of Archaeological Science**, v. 36, p. 2502-6, 2009. doi: 10.1016/j.jas.2009.06.025.

SANDOR, J. A.; GERSPER, P. L.; HAWLEY, J. W. Prehistoric agricultural terraces and soils in the Mimbres area, New Mexico. **World Archaeology**, v. 22, p. 70-86, 1990. doi: 10.1080/00438243.1990.9980130.

SANDOR, J. A. et al. Soils in ancient irrigated agricultural terraces in the Atacama Desert, Chile. **Geoarchaeology**, v. 37, p. 96-119, 2022. doi: 10.1002/GEA.21834.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 7. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. 100 p.

SCHAEFER, C. E. G. R. et al. Micromorphology and electron microprobe analysis of phosphorus and potassium forms of an Indian Black Earth (IBE) Anthrosol from Western Amazonia. **Soil Research**, v. 42, p. 401, 2004. doi: 10.1071/SR03106.

SERNAGEOMIN. **Mapa Geológico de Chile: versión digital**. Publicación Geológica Digital, n. 4, 2003.

SHARMA, M. K.; THAYYEN, R. J.; SHYAMLAL. Role of sediment in solute acquisition in the Himalayan glacier meltwater stream, Gangotri glacier, Uttarakhand, India. **Hydrological Processes**, v. 35, 2021. doi: 10.1002/hyp.14018.

SILVA E SILVA, A. et al. A new frontier of archaeological dark earth at the northern Amazonia headwaters of Roraima state: Soil attributes and landscape interplays. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 133, 104687, 2024. doi: 10.1016/j.jsames.2023.104687.

SILVA, R. M. et al. Tolerance of alfafa varieties subjected to salinity. **Irriga**, v. 28, p. 1-21, 2023.

TAPIA, J. et al. Geology and geochemistry of the Atacama Desert. **Antonie Van Leeuwenhoek**, v. 111, p. 1273-91, 2018. doi: 10.1007/s10482-018-1024-x.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TÓTH, G. et al. **Soils of the European Union**. Luxembourg: JRC Scientific and Technical Reports, Office for Official Publications of the European Communities, 2008.

TREACY, J. M. **Las chacras de Coporaque: andenería y riego en el valle del Colca**. Lima: Instituto de Estudios Peruanos, 1994.

VARGAS, R. et al. **Handbook for saline soil management**. Rome: Food and Agriculture Organization, 2018.

VASILCHENKO, A. V.; VASILCHENKO, A. S. Plaggic anthrosol in modern research: Genesis, properties and carbon sequestration potential. **Catena**, v. 234, 2024. doi: 10.1016/j.catena.2023.107626.

VETTERLEIN, Doris et al. Illite transformation and potassium release upon changes in composition of the rhizosphere soil solution. **Plant and Soil**, v. 371, n. 1-2, p. 267-279, 22 out. 2013.

VICENCIO VELOSO, J. et al. The Overlooked Role of Moist Northerlies as a Source of Summer Rainfall in the Hyperarid Atacama Desert. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 129, 2024. doi: 10.1029/2024JD041021.

VILLAGRÁN, C.; CASTRO, V. **Ciencia indígena de los Andes del norte de Chile**. Santiago: Editorial Universitaria, 2004.

WHITTIG, L. D.; ALLARDICE, W. R. X-ray diffraction techniques. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 331–362.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant graphics for data analysis**. New York: Springer-Verlag, 2016.

WRIGHT, A. C. S. The Soil Process and the Evolution of Agriculture in Northern Chile. **Pacific Viewpoint**, v. 4, p. 65-74, 1963. doi: 10.1111/apv.41006.

YANG, T. et al. An environmentally friendly soil amendment for enhancing soil water availability in drought-prone soils. **Agronomy**, v. 12, n. 1, p. 133, 2022.

ZHAO, X. et al. Particle Size Distribution and Depth to Bedrock of Chinese Cultivated Soils: Implications for Soil Classification and Management. **Agronomy**, v. 13, p. 1248, 2023. doi: 10.3390/agronomy13051248.

CAPÍTULO 2

AGRICULTURA MILENAR DE TERRAZAS (ANDENES) DO DESERTO DO ATACAMA NO CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

1. INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas tem impactos severos globalmente, mas especificamente, nas regiões de clima árido, onde a elevação das temperaturas e a variabilidade na distribuição das chuvas ameaçam ecossistemas, a agricultura e os recursos hídricos (DIAS; MATOS, 2023; MAESTRE et al., 2021; VAZQUEZ, 2024). Nas montanhas tropicais, o aumento das temperaturas médias anuais é particularmente acentuado em altitudes elevadas, afetando os campos de neve e glaciares de alta montanha, assim como espécies adaptadas a condições extremas (IMFELD et al., 2021; TOLEDO et al., 2022).

Enquanto a vertente amazônica do Andes mostra registros de um aumento na precipitação média anual (PABÓN-CAICEDO et al., 2020), as vertentes do pacífico, voltadas ao deserto do Atacama, enfrentam secas prolongadas e processos acentuados de desertificação (BOISIER et al., 2018; MINVIELLE; GARREAUD, 2011; PABÓN-CAICEDO et al., 2020).

O Deserto do Atacama representa um dos ambientes mais extremos e desafiadores em relação às condições climáticas no planeta, combinando um gradiente acentuado de aridez, alta salinidade e precipitação ínfima (CLARKE, 2006; GJORUP et al., 2019; TAPIA et al., 2018). Apesar do cenário desafiante, povos pré-hispânicos desenvolveram seus sistemas agrícolas ao longo de milênios no Deserto Atacameno, com registros que remontam a 3950 antes do presente (DENEVAN, 2001; TREACY, 1994).

É importante destacar que este estudo não tem pretensão etnológica. A partir de uma abordagem interdisciplinar, neste capítulo, pesquisamos os Antrossolos como elemento resultante das relações cultura e natureza da paisagem agrícola do Deserto. Para além das coletas de solo, interagimos com interlocutores da pesquisa, para entender um pouco desse solo que se apresenta hoje, dialogando com agricultoras e agricultoras que se autodenominam *Lican Antai*.

No Atacama, a *Ley 19253* (CHILE, 1993) reconhece a presença de diversas etnias indígenas naquele território, destacando-se os *Lican Antai*, sendo esses reconhecidos como povos herdeiros e mantenedores de sistemas agropastoris de

elevada sustentabilidade e resiliência, adaptados ao clima extremo do Deserto. Sabe-se que os povos do Atacama têm sua história marcada por descontinuidades e certas rupturas nesta relação cultura e natureza, com destaque recente para os efeitos mineração e das mudanças climáticas no acesso e uso da água (CARRASCO, 2016). Reconhece-se, por outro lado, que há um legado de resiliência e conhecimento ancestral que contribui para o enfrentamento de ameaças que são diversas ordens.

Ao focar, dentre essas diversas ameaças, nas mudanças climáticas, nos interessa compreender como os Lican Antai enfrentam hoje seus efeitos, ao mesmo tempo em que seguem inovando no manejo das águas e dos solos agrícolas. Nos interessa discutir como, mesmo diante dos desafios trazidos pelas mudanças climáticas, especialmente em relação à disponibilidade hídrica, a agricultura Atacamenha se mantém resiliente, sustentada por uma tradição cultural que atravessa séculos (GONZÁLEZ-PIZARRO; GALENO-IBACETA, 2018; PARCERO-OUBIÑA et al., 2017; SANDOR; HOMBURG, 2017).

Técnicas sofisticadas de manejo do solo e da água, capazes de garantir a segurança alimentar das comunidades locais, mesmo em condições de escassez hídrica e limitações edáficas (ROMO et al., 1999; SANDOR et al., 2022). Tais estratégias, moldadas por gerações através de um contínuo processo de observação e adaptação, refletem um profundo conhecimento sobre estes ecossistemas e contribuíram decisivamente para a ocupação e permanência humana em um dos ambientes mais áridos do planeta (VILLAGRÁN; CASTRO, 2004).

O aporte de água para irrigação vem do derretimento dos campos de neve sazonais das altas montanhas dos Andes (SANDOR et al., 2022). Com menor precipitação de neve, impulsionada pelo aquecimento global e por mudanças nos padrões pluviométricos e projeções que indicam uma significativa redução ainda neste século, há escassez de água na região de degelo comprometendo assim a segurança hídrica e alimentar no Atacama, (NAGY et al., 2025; SENRA et al., 2019).

Essas transformações nos padrões climáticos impactam diretamente a vida das populações locais. A maior frequência de eventos extremos, de precipitações avassaladoras ou secas intensas no Atacama (GJORUP et al., 2019; KIM et al., 2022), aumenta o risco de inviabilizar as formas tradicionais de agricultura desenvolvidas nesta região.

A Etnopedologia nos concede o conceito de cosmovisão, interessante para compreender especificidades dessa dinâmica entre cultura e natureza na agricultura. Ela é entendida como um conjunto de referências culturais que guiam a maneira como os grupos humanos percebem e explicam o mundo, influenciando suas ideias sobre o cosmos, o sagrado, os princípios éticos e as formas de organização social (NICKEL JUNIOR; DÜCK, 2021). Nesta perspectiva, compreendemos que o manejo do solo e da água, no Deserto do Atacama, estão historicamente associadas à cosmovisão dos povos pré-hispânicos locais, acerca das especificidades do ambiente árido (MOYANO; CRUZ; BUSTAMANTE, 2020; POURRUT; NÚÑEZ, 1995). Essas práticas, transmitidas ao longo das gerações, refletem o profundo conhecimento sobre o funcionamento dos ecossistemas desérticos e a conexão ancestral com esse território (DENEVAN, 2001; IMFELD et al., 2021; JACOBSEN; MUJICA; ORTIZ, 2003; TRONCOSO et al., 2019; VILLAGRÁN; CASTRO, 2004).

As *terrazas* ou Andenes, outro conceito importante neste trabalho, são estruturas amuralhadas de pedras encaixadas, confinando uma mistura preparada de solo, e são construídas para viabilizar a agricultura no Atacama, a fim de garantir e aumentar a retenção da umidade, reduzir a erosão e facilitar o cultivo (GONZÁLEZ-PIZARRO; GALENO-IBACETA, 2018; SANDOR et al., 2022). Evidências arqueológicas apontam que o cultivo nessas estruturas remonta a três milênios, conduzido por grupos de povos ancestrais que habitaram o território atacamenho desde muito antes da dominação incaica, demonstrando uma longa trajetória de adaptação e conhecimento ambiental acumulado (PARCERO-OUBIÑA et al., 2017).

Aqui, entendemos as *terrazas* como uma experiência sociomaterial (Arce; Charão-Marques, 2021) que não apenas viabiliza o cultivo agrícola no deserto, mas orienta o próprio funcionamento da vida naquele lugar. Em torno das *terrazas* se organiza a ação comunitária para o manejo da água como um bem comum. As relações de parentesco definem o direito de uso da fração de terra, passado de geração em geração. Nessa perspectiva, as *terrazas* são resultado da interconexão das relações sociais e as propriedades materiais do território. Partiu-se do pressuposto de que é essa dinâmica, de sociomaterialidades em torno das *terrazas* que permite, ainda hoje, a permanência e resiliência da agricultura e do modo de vida *Lican Antai*, apesar dos múltiplos desafios e ameaças postas a esse modo de vida.

O presente artigo de caráter exploratório, propõe uma análise descritiva do manejo agrícola tradicional de solo e da água em *terrazas*, em duas regiões do Deserto do Atacama, Alto Loa e arredores de San Pedro de Atacama, a partir do emprego de uma metodologia mista (CRESWELL; CRESWELL, 2017). De forma qualitativa, partiu-se dos preceitos da etnopedologia (Barrera-Bassols; Zinck, 2003) para realização de entrevistas abertas (Nogueira-Martins; Bógus, 2004) com agricultoras e agricultores que se autodenominam *Lican Antai* (*Atacameños pela Ley Indígena 19253* (Chile, 1993), para compreender os sistemas de manejo do solo e da água e as estratégias adotadas em relação aos eventos climáticos extremos. Também foram coletadas amostras de solo em áreas agrícolas e não agrícolas para a realização das análises de Matéria Orgânica Particulada (MOP), Matéria Orgânica Associada aos Minerais (MOAM), pH, condutividade elétrica (EC), sódio trocável (Na), capacidade de troca catiônica efetiva (t) e carbono orgânico (TOC). Essas análises quantitativas tiveram como propósito complementar os dados das entrevistas, compondo as evidências sobre o manejo tradicional e sustentável desses solos.

2. DESENHO METODOLÓGICO

2.1. Área do Estudo

A pesquisa foi realizada em 2024, em seis comunidades do Deserto do Atacama, situadas na região de Antofagasta, na província de El Loa. Quatro dessas localidades (Ayquina, Caspana, Cupo e Toconce) fazem parte do Alto El Loa, na porção norte da província. As outras duas, Camar e Socaire, encontram-se próximas a São Pedro de Atacama, no setor sul da província. A Figura 11 exibe um mapa com uma visão dos povoados estudados.

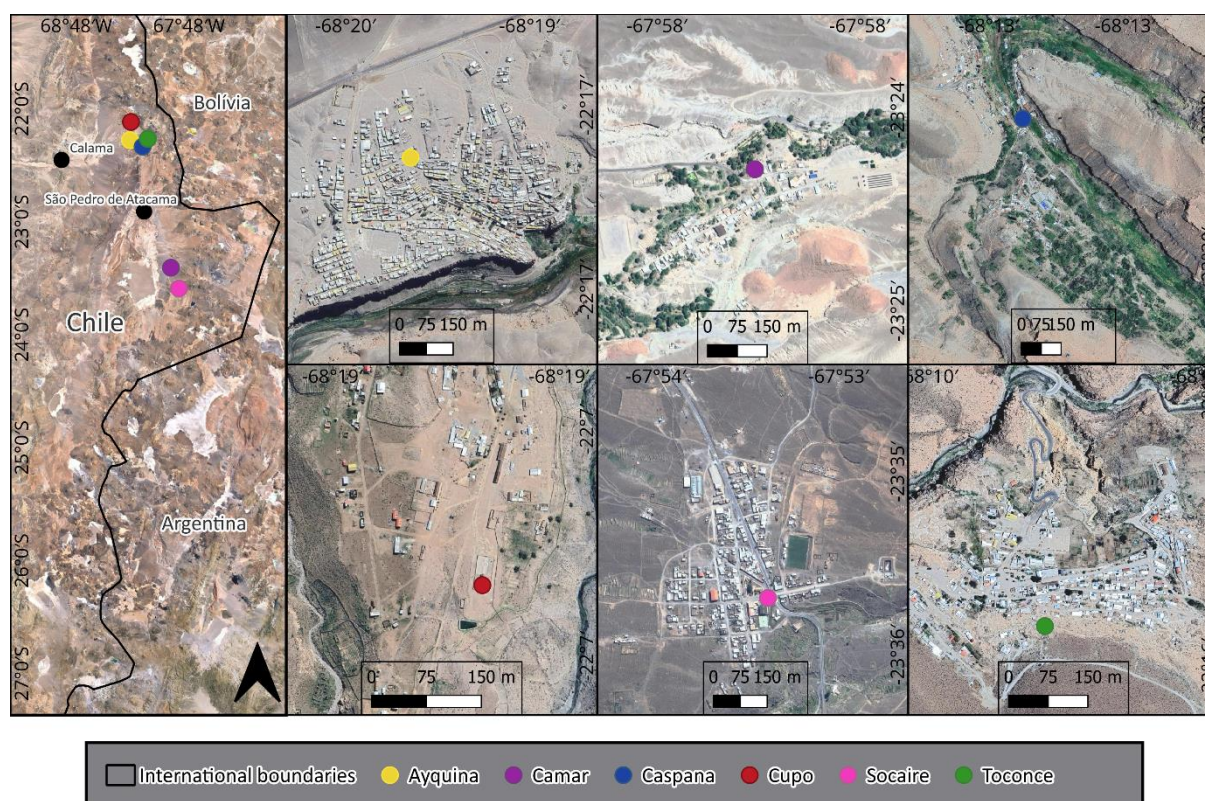


Figura 11. Mapa dos povoados

As áreas visitadas correspondem às propriedades agrícolas em de cada povoado, tendo características particulares de acesso, tipos de cultivo e relevo conforme apresentado na Tabela 11, que mostra uma síntese das informações de cada povoado. No entanto, todas compartilham um elemento em comum que as conecta pela ancestralidade e tradição: a prática agrícola baseada no cultivo em *terrazas*. As áreas cultivadas localizam-se sempre próximas aos canais de irrigação, sendo abastecidas majoritariamente por águas correntes de vertentes à montante. Em contraste, as áreas não agricultadas circundam as zonas de cultivo, porém fora do alcance da zona irrigável. Os cursos d'água, como rios ou *quebradas*, *denominação local de pequenos vales tributários da drenagem principal*, estão localizados relativamente próximos dessas áreas, embora nem sempre tenham influência direta sobre o funcionamento agrícola.

Tabela 11. Principais características de cada povoado.

Povoado	População (hab)	Elevação (manm)	Localização	Corpo hídrico próximo	Precipitação Anual (mm)	Temperatura média mensal (°C)	Relevo dos povoados
Ayquina	50	3026 ± 28	74 km de Calama	Rio Salado	36.81 ± 0.19	17.50 ± 0.01	Segmentos elevados do cânion, encostas médias

							(midslopes) e sopés
Camar	80	2717 ± 25	75 km de San Pedro de Atacama	Quebrada de Camar	45.28 ± 0.15	16.70 ± 0.04	Morros suaves e sopés
Caspana	250	3263 ± 49	85 km de Calama	Rio Caspana	41.91 ± 0.19	17.05 ± 0.03	Planície de inundação do rio Caspana e vale fluvial com pequenos afluentes (quebradas)
Cupo	44	3363 ± 27	110 km de Calama	Quebrada de Cupo	42.03 ± 0.58	16.67 ± 0.01	Segmentos superiores do cânion e sopés
Socaire	400	3262 ± 30	86 km de San Pedro de Atacama	Quebrada de Socaire	47.38 ± 0.14	16.60 ± 0.01	Encosta suavemente ondulada e sopés
Toconce	260	3300 ± 50	91 km de Calama	Rio Toconce	43.46 ± 0.56	16.88 ± 0.08	Alto da escarpa, encostas médias do cânion e sopés

Na região do Alto Loa, os pequenos povoados de Ayquina, Caspana, Cupo e Toconce estão mais isolados, ou preservados em alguma medida quando comparados aos povoados de Camar e Socaire, mais próximos à San Pedro do Atacama, onde o turismo internacional tem forte impacto. Todo o Deserto do Atacama, entretanto, sofre impacto direto da atividade mineraria, responsável por cerca de 10% do PIB do Chile (CEPAL, 2023).

No Alto Loa, a população residente nos povoados tem diminuído ao longo de décadas. Homens e jovens, saem para trabalhar nas cidades e na mineração, deixando enormes áreas de *terrazas* agrícolas abandonadas (ver figura 18.a, p 36), por inúmeras razões, ao longo da história. São as mulheres, majoritariamente, segundo observações em campo, as responsáveis pelas atividades agropastoris e por levar adiante os conhecimentos tradicionais. Aos arredores de San Pedro a agricultura é mais tecnificada, com *terrazas* mais novas (Figura 18.d, p 36), e o mesmo padrão matriarcal de cultivo e manutenção da tradicionalidade, em relevos mais suavizados.

2.2. Entrevistas

O trabalho de campo foi realizado em janeiro de 2024. O contato inicial com os(as) participantes ocorreu por meio da mediação de uma agência de turismo comunitário sediada em Calama, a qual facilitou a interlocução com o primeiro agricultor entrevistado. A partir deste primeiro contato, foram indicados outros(as) participantes, incluindo agricultores(as) cujos nomes foram obtidos por meio de

lideranças locais dos *pueblos*. Assim, foi adotado o método de amostragem por indicação, também conhecido como bola de neve (BALDIN; MUNHOZ, 2012), para a seleção dos sujeitos da pesquisa. No total, foram entrevistadas dez pessoas envolvidas com a agricultura tradicional no contexto do deserto, sendo sete mulheres e três homens, todos com idade igual ou superior a dezoito anos.

Para a condução das entrevistas, seguimos as diretrizes da Convenção nº 169 da OIT (OIT, 1989) e da Norma Operacional nº 001/2013 do CONEP/CEP (BRASIL, 2013), para elaborar um instrumento de condução ética da pesquisa. Todas as entrevistas foram previamente acordadas com os participantes por meio do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), assegurando que estes compreendessem os objetivos, métodos, benefícios e possíveis riscos da pesquisa, respeitando assim o princípio da autonomia e do consentimento informado, garantindo o anonimato de todos participantes, para a confidencialidade e a proteção de suas informações.

Ressalta-se que esta pesquisa respeitou a propriedade intelectual dos conhecimentos indígenas, evitando práticas de apropriação indevida. Reconhece a importância cultural desses conhecimentos e sua conexão com as terras e recursos naturais, conforme estabelecido pela Convenção nº 169. Para a realização das entrevistas, as visitas nas propriedades ocorriam sempre nos horários acordados com os participantes, em meio a caminhadas pelas áreas agricultadas e ao trabalho participativo junto aos agricultores. Os dados foram registrados em cadernos de campo e registros fotográficos.

As entrevistas abertas (Nogueira-Martins; Bógus, 2004) consistiram em conversas guiadas por um tema inicial, buscando oferecer maior liberdade aos entrevistados para expressarem suas percepções. Os temas foram inspirados pelos preceitos da etnopedologia (Barrera-Bassols; Zinck, 2003) e organizados a partir da tríade que envolve a importância do corpus (cognição), o cosmos (crenças e simbolismos) e a práxis (ação) para a compreensão do conhecimento tradicional sobre o manejo do solo e da água na agricultura de deserto (Figura 13).

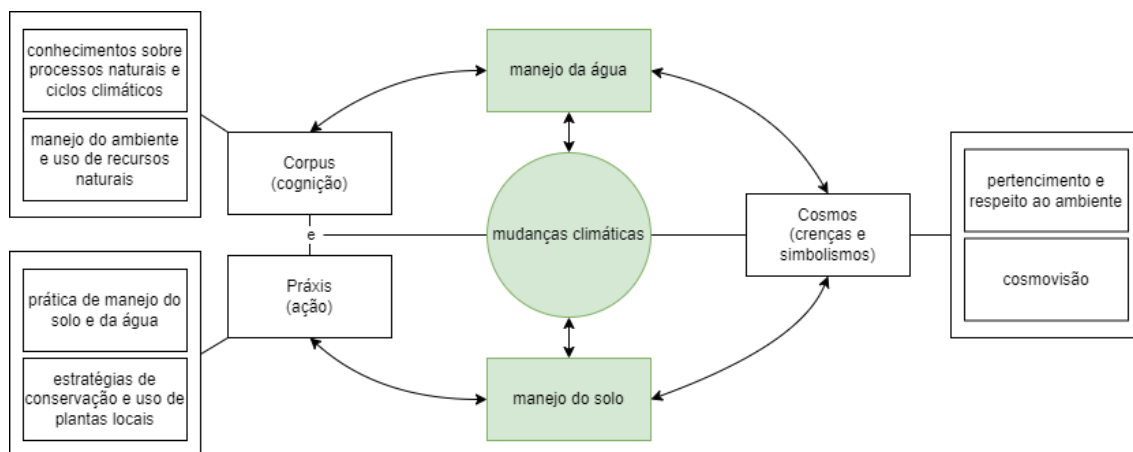


Figura 13. Preceitos da etnopedologia (quadros brancos) e objetivos da pesquisa.

Os dados foram analisados com base em uma abordagem qualitativa (LIMONGI et al., 2017). As transcritas, utilizando como referência as anotações da caderneta de campo e os áudios gravados durante a coleta. Em seguida, os pontos convergentes e divergentes entre os discursos dos entrevistados foram identificados e agrupados. Dessa forma, as semelhanças observadas nas falas dos participantes, quando analisadas sob a perspectiva dos eixos temáticos da etnopedologia, revelam o panorama de aspectos mais consensuais entre as informações coletadas.

A realização desta pesquisa envolveu desafios significativos relacionados ao acesso e à construção das interlocuções em território chileno, especialmente por se tratar de comunidades locais que atribuem profundo valor simbólico, histórico e produtivo às áreas estudadas. A condição de pesquisadores brasileiros implicou em atravessar barreiras linguísticas, culturais e institucionais, exigindo sensibilidade, respeito e tempo para o estabelecimento de vínculos de confiança com os interlocutores locais. O êxito do trabalho só foi possível graças à mediação de organizações comunitárias atuantes na região, à escuta atenta das lideranças locais e à adoção de uma postura ética e colaborativa ao longo de todo o processo. Assim, os desafios de inserção em um território estrangeiro, marcado por uma intensa carga identitária e patrimonial, foram enfrentados com responsabilidade e resultaram na construção de um diálogo intercultural legítimo e produtivo.

2.3. Coletas e análises de solos

As coletas de solos ocorreram concomitantemente às entrevistas. Foram coletadas 72 amostras em solos agricultados (CS) e 24 em solos não agrícolas (NCS) (Tabela 12), com o objetivo de obter indicadores do uso desses solos, resultantes do

manejo agrícola tradicional praticado nas terras. Como parte das análises, procedeu-se à separação das frações físicas da matéria orgânica do solo em duas categorias: Matéria Orgânica Particulada (MOP) e Matéria Orgânica Associada aos Minerais (MOAM). A MOP está associada às frações mais grosseiras do solo, como silte e areia, sendo mais facilmente decomposta e, conseqüentemente, mais suscetível à perda para o ambiente. Em contraste, a MOAM encontra-se ligada às frações mais finas do solo, apresentando maior estabilidade e resistência à decomposição. Sua presença indica que parte do carbono orgânico permanece retido no solo, atuando como um reservatório e contribuindo para a mitigação da emissão de carbono para a atmosfera.

Tabela 12. Amostragem de solo por povoado

Villages	Número de Amostras	
	Solos cultivados (CS)	Solos não cultivados (NCS)
Ayquina	9	3
Camar	12	3
Caspana	9	3
Cupo	6	3
Socaire	12	6
Toconce	24	6

Esse fracionamento físico da matéria orgânica foi feito em laboratório a partir de peneiramento úmido em peneira de 100 mesh, pós dispersão com hexametáfosfato de sódio com agitação por 16 horas. Depois foi utilizado HCl a 0.1M para remoção de carbonatos e quantificado carbono e o nitrogênio usando o analisador elemental CHN (TEIXEIRA et al., 2017).

Simultaneamente, outra alíquota das amostras foi secas ao ar, peneiradas (2 mm) e moídas em terra fina até 105 mesh para uniformização. Foram analisados o pH, os teores de sódio trocável (Na), carbono orgânico total (TOC) e a CTC efetiva foi calculada em acordo com os procedimentos padrões de Teixeira et al. (2017). A condutividade elétrica (EC) foi determinada a partir de um extrato 1:5 solo/água utilizando o método de diluição (Rayment e Lyons, 2011), para avaliar a salinidade do solo.

3. RESULTADOS

3.1. O manejo tradicional da água em terrazas e as percepções de mudanças climáticas

O manejo tradicional da água nas *terrazas* agrícolas é realizado por meio de um sistema de inundação intermitente, no qual a área cultivada é irrigada até que toda a sua superfície esteja coberta por uma lâmina d'água, deixando o solo em condições de saturação, sendo naturalmente drenado posteriormente e ficando em condições de umidade próximas à capacidade de campo. A condução da água até as *terrazas* ocorre por meio de canais e ação da gravidade. A água é captada de vertentes (e as vezes de corpos hídricos próximos, como no caso de Caspana) e mantida em um reservatório em pontos elevados da paisagem. De lá, a água é transmitida para um canal principal, usualmente de alvenaria ou pedra, e passada para canais secundários ramificados do canal principal. As *terrazas* são construídas em diferentes níveis, abaixo do canal principal e a entrada de água nelas é controlada manualmente pelos agricultores e agricultoras por comportas formadas por pedras e sacos de contenção (Figura 14).

Os canais (secundários) são construídos para levar água até as *terrazas* e há uma organização das rochas para diminuir a correnteza (agricultora de Socaire).

Dois tipos distintos de *terrazas* foram identificados (Figuras 15 e 16): As *terrazas* em que há apenas entrada de água e consequente inundação, e os que a água sai pelo lado oposto ao de entrada, criando certo fluxo dentro da área agricultada.



Figura 14. a) canal de irrigação e comporta de direcionamento; b) canal secundário e comportas nas *terrazas*; c) visão próxima de uma comporta logo após o fechamento.

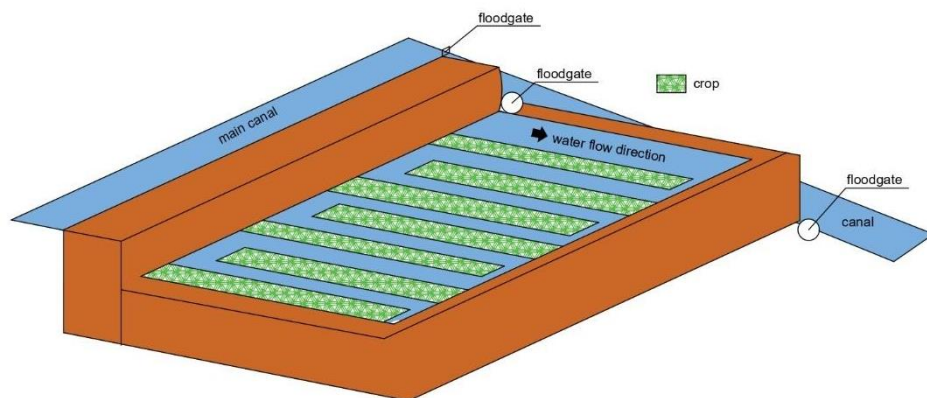


Figura 15. Esboço de um dos distintos tipos de *terrazas* com entrada única de irrigação.

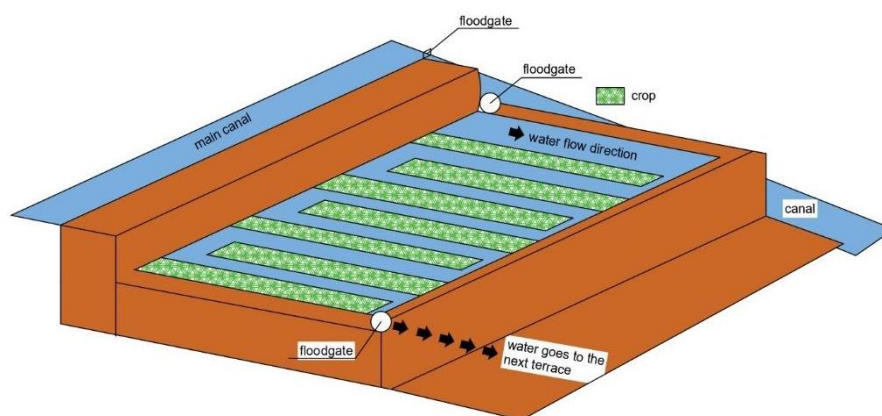


Figura 16. Esboço de um dos distintos tipos de *terrazza* com entrada única e saída de irrigação para área subsequente.

O controle da comporta do reservatório para liberação da água de irrigação é regulado de forma comunitária. Esse controle pode ser exercido diretamente entre os vizinhos que utilizam o recurso hídrico, por meio de acordos mútuos, nos quais os usuários estabelecem conjuntamente a quantidade de água necessária e o tempo de uso, elaborando um cronograma que contempla as necessidades de todos. Alternativamente, a gestão pode ser organizada por instâncias administrativas locais, conhecidas como *las directivas*. Nesses casos, o controle e a fiscalização do uso da água são atribuídos a uma entidade específica vinculada às lideranças administrativas, o *Juez de Agua* ou *Celador*, responsável por assegurar o cumprimento das normas estabelecidas. Essa função é exercida por um membro da comunidade, escolhido por meio de votação coletiva.

Em todas os povoados pesquisados, os agricultores relataram consistentemente mudanças significativas na disponibilidade de água e nos padrões de chuva e neve nas partes altas. Todos observaram uma diminuição marcante no fluxo de água através dos canais de irrigação e das nascentes ao longo do tempo. Agricultores de Toconce, Ayquina, Cupo e Camar mencionaram especificamente ter observado menos acúmulo de neve no topo das montanhas em comparação com décadas anteriores.

Tem menos neve no alto das montanhas e por menos tempo. Quando criança, conseguia perceber a neve presente nos topos dos *cerros* por um mês, isso há mais ou menos 40 anos (em relação à época da entrevista, em janeiro de 2024). A água que sai das vertentes vem do alto da montanha, porém ela tem diminuído e isso também diminui a água nos canais. A água nos canais diminuiu, mas também se diminuíram os agricultores (Agricultora de Ayquina).

Agricultoras e agricultores relataram que as precipitações eram, historicamente, e em certa medida, previsíveis e regulares. No entanto, todos/as entrevistados/as declararam que as chuvas se tornaram mais escassas e irregulares, caracterizadas por eventos raros, mas intensos, que frequentemente causam destruição nas lavouras, ocasionando inclusive o abandono de *terrazas* (Figura 17). Essas tempestades intensas danificam a infraestrutura dos sistemas de irrigação e erodem o solo de fertilidade longamente construída das *terrazas*.

As chuvas são mais raras, antigamente elas eram mais normais, agora acontecem tempestades que lavam os terraços mais acima, destruindo tudo. Isso tudo faz com que o leito do rio suba, fazendo as *terrazas* mais próximas serem abandonadas pelo encharcamento (Agricultora de Ayquina).

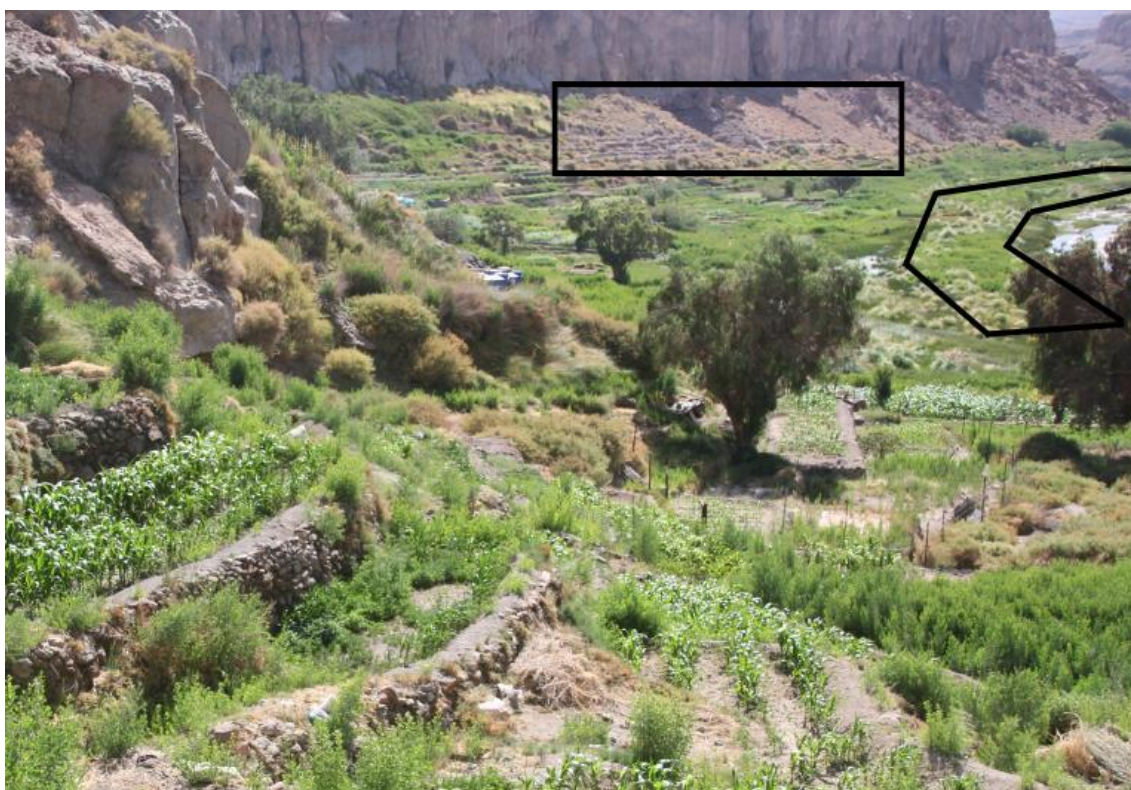


Figura 17. Áreas agrícolas de Ayquina, em destaque *terrazas* desocupadas devido impactos das chuvas.

Alguns agricultores e agricultoras entrevistadas também fizeram uma relação entre a alteração dos regimes de água – disponibilidade e qualidade - e a atividade minerária na região. Agricultores de Toconce, Cupo, Socaire e Camar especificamente conectaram a condição de escassez de água às atividades de mineração, citando a extração irregular de água e os desvios de canalização como fatores contribuintes. Um agricultor de Camar observou que as secas generalizadas começaram na década de 2000, após o estabelecimento das operações de mineração de cobre em 1985.

Antes os terraços eram mais próximos do rio, porém com o rompimento dos canais, houve a mudança para o plano (alto do povoado). Desde 2005, percebo que a água, as chuvas e a neve diminuíram muito, além de aparecer muita contaminação, com a presença de material particulado vindo da mineração. As vertentes diminuíram com a canalização feita pela CODELCO, em que não houve outorga ao setor, apenas diminuiu a água que chegava no povoado (Agricultor de Cupo).

A percepção quanto ao aumento das temperaturas médias anuais foi relatada em todos os povoados visitados. Agricultores de Caspana, Socaire e Camar relataram que os anos recentes (particularmente 2024) têm sido notavelmente mais quentes do que no passado. Um agricultor de Camar destacou que, em sua percepção, esse calor tem perturbado os ciclos normais de desenvolvimento das culturas, causando amadurecimento precoce sem crescimento completo.

O cultivo do tomate está diferente. Ele está queimado, mais maduro, sem ter crescido quase nada. Era esperado para fevereiro, mas pra isso precisa regar muito mais pra isso. Desde os anos 90, o tempo mudou muito, a água está diminuindo, antes chovia e recarregava as vertentes. Tínhamos uma distinção mais precisa das estações, desde o último ano, não se vê mais essa troca (agricultor de Camar).

Foram relatadas adaptações nas práticas tradicionais de irrigação em todos os povoados, em relação aos anos subsequentes, em resposta aos padrões de disponibilidade hídrica concomitante à essa percepção de aumento de temperaturas (Tabela 12).

Tabela 13. Adaptações nas práticas tradicionais de irrigação por povoado

Povoado	Frequência de Irrigação	Variações Específicas por Cultura	Gestão
Ayquina	No passado, não especificado, atualmente a cada 2 dias.	Não especificado	Vizinhos coordenam o acesso à comporta do reservatório
Camar	Originalmente quinzenal, agora mais frequente devido ao aumento das temperaturas.	Milho e abóboras: a cada 8 dias Tomates: a cada 4 dias	Coordenação do uso pela junta de vizinhos, análogo a <i>Las Directivas</i>
Caspana	“Antigamente o tempo de intervalo entre as regas eram menores”. Cronograma controlado (frequência não especificada).	Não especificado	Coordenação por <i>Las Directivas</i> por cronogramas controlados devido à redução da disponibilidade de água
Cupo	Anteriormente havia maior disponibilidade de água, mas sem frequência especificada. Atualmente a cada 10-12 dias.	Não especificado	Coordenação da comunidade sobre o uso
Socaire	Anteriormente contavam com apenas água das chuvas na irrigação.	Vegetais e favas: a cada quarto de volta (7 dias) Batatas e milho: a cada	Distribuição supervisionada pelo <i>Juez de Agua</i>

	Atualmente, baseado em sistema de rotação (ciclo de aproximadamente 30 dias).	meia volta Trigo: volta completa	
Toconce	Não há registro de como era anteriormente, apenas que Toconce possui " <i>Libre agua</i> ". Atualmente, a irrigação ocorre a cada 4 dias, reduzindo para uma vez por semana.	Fases iniciais: a cada 4 dias Plantas maduras: uma vez por semana	Cronograma do agricultor em consonância com a comunidade. <i>Celador</i> controla a abertura do reservatório.

Os cronogramas de irrigação variam de acordo com a localização e o tipo de cultura, sendo que a maioria dos agricultores e agricultoras relataram que houve um aumento nos intervalos dos ciclos de irrigação para acomodar a diminuição da disponibilidade de água, tendo em vista maiores quantidades ou presença de precipitações mais padronizadas no passado. A exceção é Camar, onde houve aumento na frequência de irrigação devido ao aumento recente da temperatura.

3.2. Manejo tradicional do Solo em *terrazas*

Os solos do Deserto do Atacama apresentam características variadas, sendo a textura predominantemente arenosa um traço comum que se estende por grande parte da paisagem. Para viabilizar a prática agrícola nesse ambiente de extremos climáticos, os povos pré-hispânicos desenvolveram técnicas de terraceamento, adaptando-se tanto ao relevo diversificado quanto às condições ambientais marcadas pela escassez de água, baixos teores de matéria orgânica e solos com baixo grau de desenvolvimento estrutural (Figura 18).



Figura 18. a) *Terrazas* em Toconce; b) Caspana; c) Ayquina; d) Socaire; e) Cupo

As *terrazas* são construídas com base em dois eixos principais: a estruturação física e o preparo do solo. A estruturação física inicia-se com a seleção da área, na qual o solo arenoso é remobilizado até certa profundidade (entre 2 a 3 metros, como observado em Camar, por exemplo). Em seguida, procede-se à disposição sistemática de rochas selecionadas, formando inicialmente uma base rochosa, contida por um muro de pedras encaixadas. O segundo eixo consiste no preenchimento com solo e abono (esterco) no terraço estruturado. Nessa etapa, é realizado o peneiramento do solo arenoso, com a remoção de partículas grosseiras, como pedregulhos, cascalhos e parte da areia, de modo a selecionar um material mais fino. A esse solo, ainda durante a etapa de preparo, é adicionado esterco animal, o que compõe a mistura utilizada na construção da *terrazza*.

Os terraços são dos *abuelos*, não eram comprados com dinheiro, mas sim trocados entre si. Para construir, cava 2 ou 3 metros para baixo, peneirando a areia, tirando o que é mais grosso. Depois, vai colocar um tapete de pedras e usar o esterco dos burros, ovelhas e coelhos junto com cinzas de madeira, pra encher a melga (agricultora de Camar).

As *terrazas* ou Andenes no Alto Loa distinguem-se por sua antiguidade, com construções que remontam a mais de mil anos, conforme relatado por uma agricultora do povoado de Toconce. Em contraste, nos povoados da região de San Pedro de Atacama, as estruturas agrícolas são mais recentes e, em localidades como Camar, recebem a denominação de *melgas*. Embora compartilhem elementos semelhantes em sua concepção construtiva, como o encaixe das rochas e o peneiramento do solo, observa-se que a instalação das *terrazas* se encontra em relevos distintos nos sítios mais recentes, menos acidentados que o das construções mais antigas do Alto Loa (Figura 19). As características específicas do relevo das áreas agricultadas estão detalhadas na Tabela 14.



Figura 19. a e b) *Terrazas* no Alto Loa, relevo acidentado; c e d) *Terrazas* na região de San Pedro de Atacama, relevo suave.

Tabela 14. Relevo das áreas agricultadas.

Povoado	Relevo das áreas agricultadas
Ayquina	Escarpa e encostas íngremes até sopés
Camar	Colinas, morros suaves e sopés
Caspana	Escarpa e encostas íngremes até sopés e fundo de vale (<i>terrazas</i> , leques aluviais) no rio Caspana e seus afluentes
Cupo	Planalto suavemente ondulado e escarpas de cânions
Socaire	Sopés e vales amplos com colinas e encostas suavemente onduladas
Toconce	Escarpas e encostas íngremes até sopés e fundo de vale (<i>terrazas</i> , leques aluviais)

A rotação de culturas aparece como uma prática universal, embora com variações na sequência e no tempo específicos. Além disso, há uma sucessão de cultivos ajustada às diferentes exigências nutricionais das espécies. Todos os agricultores reconheceram a importância de permitir que a terra descanse por meio de períodos de pousio, variando de 6 meses a 2 anos, dependendo do povoado. O agricultor de Toconce expressou uma crença comum de que os períodos de pousio "aumentam a força do solo", enquanto a agricultora de Socaire seguia um padrão específico de sucessão de plantio até retornar ao pousio. Durante esse tempo, foi destacado o quanto se crescem *malezas*, plantas indesejadas, que crescem espontaneamente durante o tempo de pousio, sendo necessário removê-las quando

é dada a hora de voltar a cultivar. Os tempos de pousio e as culturas estão explicitados na tabela 15.

As terrazas são construídas com a junta de pedras, terra peneirada e abono. Primeiro coloca esterco em alguma terra que estava descansando, isso em maio, depois planta batata, fava, *choclo*, *maize*, trigo e descansa, sem colocar mais nada, talvez por último as vezes planta alfafa. Depois de tudo isso, a terra vai descansar por 6 meses, pra depois começar de novo. (agricultora de Socaire).

A fertilização orgânica predominou em todas os povoados. O esterco animal (abono) constitui a principal fonte de reposição nutricional, com a maioria dos agricultores utilizando esterco de animais criados localmente ou adquiridos de povoados vizinhos (Figura 20). Vários agricultores rejeitaram explicitamente fertilizantes químicos com base em preocupações sobre os impactos de longo prazo no solo, embora alguns (particularmente em Camar) tenham relatado suplementação ocasional com produtos como sulfato de amônio para culturas específicas. A origem dos fertilizantes em cada povoado é contida na tabela 15.



Figura 20. Lhamas, ovelhas e burros em currais localizados na comunidade de Caspana, adjacente às *terrazas*.

Tabela 15. Culturas em rotação, tempo de pousio e origem do esterco utilizado.

Povoado	Culturas	Tempo de pousio	Esterco ou abono (espécie)	Esterco (aquisição)
Ayquina	Milhos diversos (principal), acelga, abóbora e girassol	Sem período especificado	Ovelha	Produção local de sua família

		(Há uma periodicidade anual de manutenção nas <i>terrazas</i>)		
Camar	Milhos diversos, abobora e tomate.	Sem período especificado	Cabra, ovelha, lhama e coelho	Produção própria
Caspana	Milho, batatas diversas, fava, alfafa, lírios, gladiolos, damasco e maçãs	Sem período especificado	Lhama, ovelha e coelho	Sem especificação (Possivelmente de aquisição no povoado)
Cupo	Batata, fava e milho negro	Sem período especificado	Cabra, ovelha, cavalo e burro	Sem especificação
Socaire	Em ordem, batatas, fava, milho (<i>choclo</i>), milho e trigo	6 meses	Lhama, cabra, coelho e ovelha	Produção própria
Toconce	Batatas variadas, mandioca, cenoura, alfafa e milho.	1 – 2 anos	Lhama e cabra	Comprado de vilarejos vizinhos

O uso de sementes de variedades locais, representou outra prática compartilhada de significado cultural. A maioria dos agricultores relatou usar material genético de próprio local, herdado de pais ou avós, vendo essa continuidade como um aspecto essencial da preservação do patrimônio. As qualidades únicas das variedades locais (como as distintas variedades de batata de Toconce) eram fontes de orgulho e identidade cultural. Além disso, as sementes são armazenadas por longos períodos em estruturas escavadas nos morros, conhecidas como *cuevas*, onde permanecem acondicionadas em recipientes diversos, sob temperaturas mais amenas e com menor variação térmica.

Gosto de cultivar o mesmo que meu *abuelo* (*El Rey de Choclo*), isso faz com que não se perca o legado ancestral e a tradição. As sementes são todas ancestrais e passadas para nós pelos mais antigos (agricultora de Ayquina).

3.3. Indicadores do uso dos solos agrícolas do deserto

As diferentes técnicas de manejo influenciam diretamente o uso dos solos. A dinâmica do carbono, avaliada por meio do fracionamento físico da matéria orgânica, revelou nuances nos teores de carbono presentes na MOP e na MOAM, além dos teores totais de carbono e nitrogênio nos CS e nos NCS. A relação C:N foi calculada com base nos valores obtidos para os CS (Tabela 16).

Tabela 16. Teores médios de carbono nas frações MOP e MOAM, teores médios totais de carbono e nitrogênio e relação C/N dos solos tradicionalmente agricultados (CS) e solos naturais (NCS).

Povoado	C (mg/dm ³) (CS vs NCS)				C _T (mg/dm ³)		N _T (mg/dm ³)		C:N (CS)
	MOAM		MOP		CS	NCS	CS	NCS	
Ayquina	19.37	18.20	57.92	39.55	77.28	57.75	3.83	3.40	20:1
Caspana	9.80	2.60	36.23	11.35	46.03	13.95	3.38	0.85	14:1
Socaire	8.28	6.55	22.08	18.50	39.09	18.55	2.94	0.78	13:1
Toconce	9.21	5.70	29.88	12.85	38.75	19.70	2.48	0.58	16:1
Camar	19.61	1.70	37.78	11.50	57.39	13.20	4.43	0.10	13:1
Cupo	11.55	4.85	29.14	14.48	30.35	25.05	1.25	1.10	24:1

As frações MOP e MOAM desempenham um papel fundamental nos ciclos biogeoquímicos do solo e são altamente influenciadas pelas mudanças climáticas. A MOP, caracterizada por partículas superiores a 53 µm e baixa densidade, consiste em fragmentos de material vegetal em decomposição que mantêm estruturas celulares reconhecíveis, apresentando alta labilidade com tempos de residência de poucos meses a anos. Por outro lado, a MOAM, com partículas inferiores a 53 µm e alta densidade, representa um carbono orgânico estabilizado através de associações íntimas com a matriz mineral do solo, resultando em maior resistência à decomposição e tempos de residência de décadas a séculos.

Enquanto a MOP atua como reservatório ativo, respondendo rapidamente a mudanças no manejo e fornecendo substrato imediato para a atividade microbiana, a MOAM funciona como reservatório passivo, proporcionando estabilidade de longo prazo através de proteção física em microporos e formação de complexos organominerais. Ademais, é possível que haja uma rápida decomposição da MOP, e quiçá da MOAM, devido a alterações nas condições do clima, podendo gerar um ciclo retroativo de emissões de CO₂ para a atmosfera.

Os teores dessas frações apresentam uma tendência consistente de maior concentração de carbono em ambas as frações nos solos cultivados (CS). Os teores totais de carbono são consistentemente maiores nos solos cultivados, evidenciando a adição substancial de matéria orgânica decorrente da atividade agrícola tradicional.

A relação C:N dos CS apresentou variação entre os povoados analisados. Foram observados valores entre 13 e 16:1 em alguns locais, enquanto em outros, a relação variou entre 16 e 20:1. Em um dos povoados, a relação C:N atingiu o valor de 24:1.

Os outros indicadores, como pH, EC, Na, t e TOC estão explicitados pelos gráficos da Figura 21. As variações entre CS e NCS ($\Delta = CS - NCS$) para os indicadores estão na tabela 17.

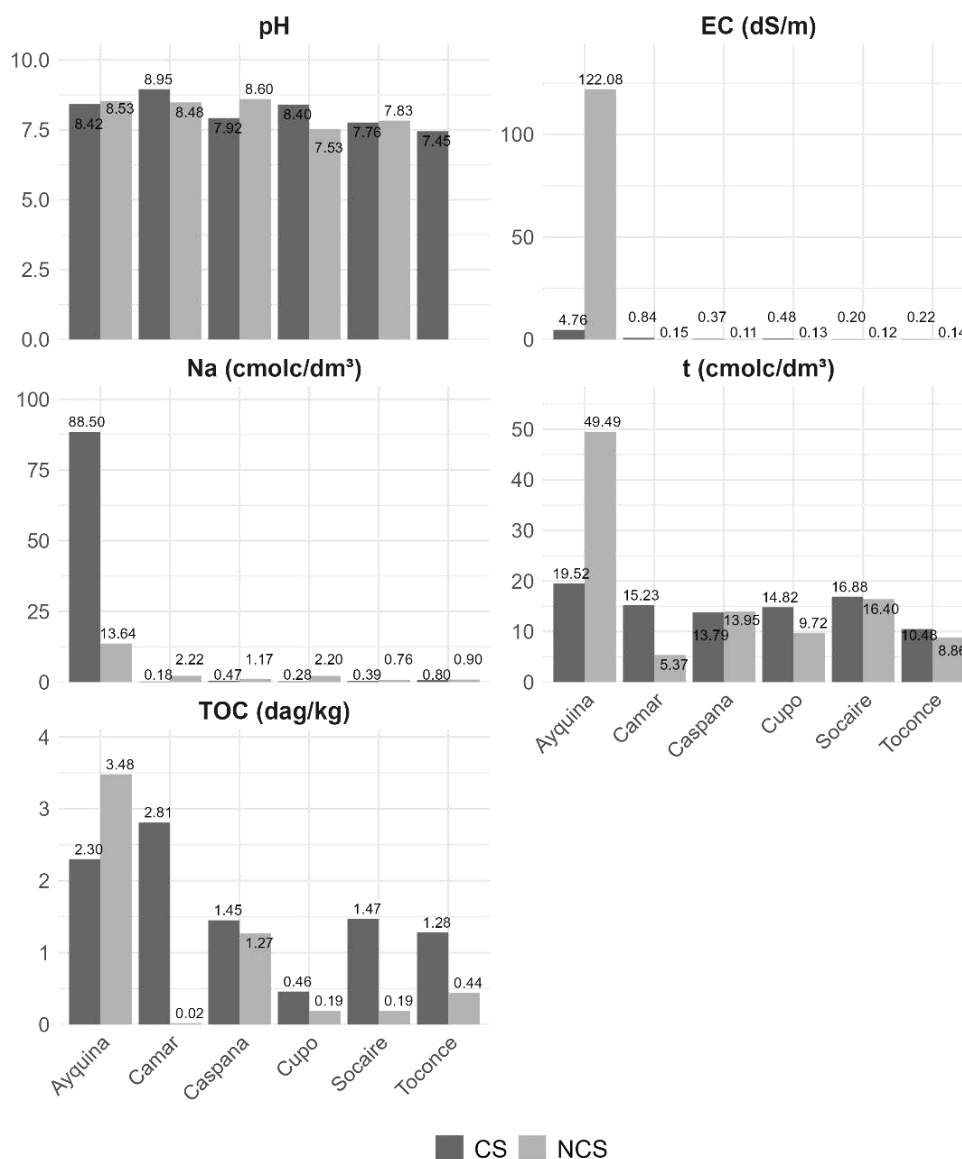


Figura 21. Médias dos indicadores de uso dos solos por povoado

Tabela 17. Variação CS – NCS para os indicadores analisados

Povoado	ΔpH	ΔEC ($\mu S/cm$)	ΔNa ($cmolc/dm^3$)	Δt ($cmolc/dm^3$)	ΔTOC (dag/kg)
Ayquina	-0.11	-117.32	74.86	-29.97	-1.18
Camar	-0.48	0.69	-2.04	9.86	2.79
Caspana	-0.56	0.26	-0.70	-0.20	1.33
Cupo	1.07	0.35	-1.92	5.10	0.81
Socaire	0.64	0.08	-0.37	0.48	1.28
Toconce	0.38	0.08	-0.10	1.62	0.84

Os valores de pH mantêm-se relativamente estáveis, com variações entre $-0,56$ e $+1,07$. Os NCS de Ayquina, Camar e Caspana apresentam valores maiores, enquanto os CS apresentaram pH mais elevado em Cupo, Socaire e Toconce.

Para a EC, destaca-se uma variação abruptamente negativa em Ayquina ($-117.325 \mu\text{S/cm}$), indicando EC significativamente maior nos NCS. Nos demais povoados, as diferenças entre CS e NCS foram menos expressivas. O comportamento do Na foi análogo ao da EC, com destaque para Ayquina, onde o teor de Na foi muito superior nos CS ($+74,86 \text{ cmolc/dm}^3$). Nos demais locais, os valores foram mais equilibrados ou levemente maiores nos NCS.

A t apresentou variações predominantemente positivas nos CS, indicando aumento da CTC com o uso agrícola, especialmente em Camar, Cupo e Socaire. A exceção foi Ayquina, com variação negativa acentuada ($-29,97$), apontando maior t nos NCS. Caspana teve diferença praticamente nula ($-0,20$). Por fim, o TOC foi maior nos CS em todos os povoados, exceto em Ayquina, onde o valor foi inferior ao dos NCS.

3.4. Rituais, crenças e a relação com o manejo e cuidado com a água e solo

A conexão espiritual com a Pachamama (a deusa da terra) é expressa por todas agricultoras e agricultores de todos os povoados, de modo mais ou menos explícito. Em algumas situações, durante nossa presença, foi possível presenciar algumas práticas ritualísticas que envolviam oferendas antes do plantio e durante atividades agrícolas. As oferendas incluíam folhas de coca, vinho e sementes, e segundo os/as interlocutores, serviriam para honrar a terra e garantir o sucesso agrícola (Figura 22).



Figura 22. *Pago a Pachamama*, ritual de oferenda.

Não tivemos a oportunidade de presenciar um ritual da *limpia de canales* (limpeza dos canais), importante para todos os povoados, tanto como manutenção prática quanto como observância espiritual. Contudo, podemos visitar mais de um local onde acontecem os rituais e tivemos a oportunidade de escutar e entender um pouco da importância daquele ritual para cada comunidade. Nesta celebração, antigos moradores e familiares que foram morar e trabalhar nas cidades, retornam para participar dessa importante e ancestral celebração. Essa atividade comunitária combinava trabalho coletivo com celebração, reforçando tanto a infraestrutura quanto os laços sociais. Em Socaire, esse evento era conhecido como "Cumpleaños de Agua", destacando a personificação dos elementos naturais (Figura 23).



Figura 23. Áreas comunitárias de suporte e celebração para a *limpia de canales*, destinadas à alimentação, ao descanso dos participantes e a comemoração ao final do trabalho. a) Espaço de descanso e alimentação em Ayquina.; b) Ponto de reunião e preparo de alimentos em Toconce.

Os agricultores expressaram universalmente uma conexão profunda e formadora de identidade com suas práticas agrícolas. Quando questionados sobre o que os faria abandonar a agricultura, vários agricultores de diferentes povoados deram

respostas quase idênticas: apenas a completa falta de água ou a morte os separariam da terra. A agricultora de Caspana afirmou que só deixaria a terra "se a água deixasse de existir ou após sua morte", ecoando sentimentos semelhantes dos agricultores de Toconce e Camar.

Vários agricultores observaram uma tendência crescente em direção ao individualismo em comparação com as práticas coletivas históricas. Embora, as estruturas de governança comunitária para o gerenciamento dos recursos mostraram semelhanças entre os povoados como visto em seções passadas. Esses sistemas equilibravam as necessidades agrícolas individuais com o gerenciamento coletivo de recursos, principalmente hídricos.

O trabalho é individual, não se trabalha mais junto. Na época de seu *abuelo*, a aragem era feita por todos e todos trabalhavam comendo farinha de alfarroba. Os homens trabalhavam no arado, as mulheres no preparo do cultivo atirando as sementes. Depois havia uma grande festa. Hoje já não ocorre mais a colaboração comunitária no cultivo (agricultora de Ayquina).

Um tema recorrente em todas os povoados foi a transmissão intergeracional do conhecimento agrícola. A maioria dos agricultores aprendeu suas práticas com pais ou avós e expressou preocupação com o declínio do interesse entre as gerações mais jovens. No entanto, vários observaram que a pandemia de COVID-19 levou alguns jovens a retornarem aos povoados e à agricultura, potencialmente revertendo essa tendência.

Os jovens retornaram depois do início da pandemia, isso os fez voltar e não querer mais sair. Antes da pandemia haviam 16 famílias no povoado, agora temos 54 (agricultora de Camar).

4. DISCUSSÃO

4.1. O processo de alteração dos padrões climáticos.

O clima vem mudando constantemente a partir dos efeitos do aquecimento global. Os agricultores e agricultoras consistentemente notam um aumento nas temperaturas. Em ambientes que são necessárias adaptações mais precisas, como no deserto, pequenas alterações colocam em risco a vida e a culturalidade desses locais. Isso conversa com a atual perspectiva global sobre as mudanças climáticas, sendo elas marcada por tendências significativas de aquecimento que impactam severamente ambientes sensíveis como os de clima árido (MAESTRE et al., 2021). Ainda, no que diz respeito ao aquecimento global, há um consenso científico de que

médias anuais de temperaturas nos Andes estão em ascensão com altas taxas de aumento para até o fim do século (IMFELD et al., 2021; TOLEDO et al., 2022). Esse aumento térmico tende a ser ainda mais intenso em altitudes elevadas, o que impacta diretamente o equilíbrio dos campos de neve e desses ecossistemas gerados a partir de condições extremas (PABÓN-CAICEDO et al., 2020).

Entre os entrevistados há uma consonância de que a água tem diminuído, com alterações nos padrões de distribuição de chuvas e de sua magnitude, com episódios raros e destrutivos. Essa redução está correlacionada com a diminuição da queda de neve nos picos dos Andes, que tradicionalmente alimentam os sistemas hídricos por meio do derretimento da neve, como constatado pelos agricultores e agricultoras. A degradação da criosfera andina tem sido um reflexo evidente dessas mudanças climáticas, principalmente no que se refere ao retrocesso das geleiras. O aumento das temperaturas, combinado com variações nos padrões pluviométricos, tem acelerado a perda de massa glacial, comprometendo significativamente o suprimento hídrico de regiões que dependem do derretimento das geleiras (NAGY et al., 2025; SENRA et al., 2019).

Segundo Bozkurt et al. (2018) as geleiras andinas continuam a diminuir tanto em volume quanto em extensão, o que agrava os desafios relacionados à segurança hídrica e à conservação dos ecossistemas de montanha. O retrocesso das geleiras também representa uma preocupação crítica, com projeções indicando uma diminuição de 35% a 45% na cobertura de neve dos Andes até meados do século, mesmo em cenários de baixas emissões. Com isso, a permanência desses povos pré-hispânicos que precisam de água para viver e desempenhar sua atividade agrícola encontra-se amplamente ameaçada.

Além disso, ocorrem eventos de chuvas concentradas/destrutivas ou precipitações fora dos padrões esperados pelos participantes locais. Esses fenômenos estão associados às mudanças climáticas, que afetam a distribuição das chuvas, os índices de evaporação e evapotranspiração, além de provocarem alterações nos padrões de vento e aumento das temperaturas. Como consequência, episódios de precipitações intensas e potencialmente avassaladoras têm se tornado mais frequentes, em contraste com as chuvas amenas e regulares que anteriormente ocorriam na região. Essa perspectiva é corroborada por outros estudos, os quais indicam que tanto a ocorrência quanto a intensidade de eventos climáticos extremos

tendem a aumentar, agravando os riscos socioambientais na região do Atacama e nas áreas por ela abrangidas. (GJORUP et al., 2019; KIM et al., 2022).

Ao longo da história, as práticas de gestão dos recursos hídricos na região do Atacama foram influenciadas por variações climáticas e pela presença de fontes de água, como rios e mananciais (GAYO et al., 2012). O estudo sugere que durante o final do Holoceno, houve períodos de maior disponibilidade de água superficial na áreas de baixa elevação do Atacama, o que favoreceu a formação de comunidades e ecossistemas associados a cursos d'água. Porém as variações de disponibilidade hídrica demandaram que as populações indígenas elaborassem técnicas avançadas para o armazenamento de água e a adaptação a mudanças nas condições ambientais.

4.2. As *terrazas* e o manejo do solo e da água.

O manejo tradicional do solo no deserto envolve diversos processos e técnicas distintas. Entre eles, a construção das *terrazas*, com técnicas análogas ao terraceamento, se destaca como uma das principais estratégias. Essa técnica proporcionando benefícios, como o controle da erosão e a melhoria na conservação da água no solo. Esses fatores possibilitam o cultivo em encostas íngremes, viabilizando o uso da terra mesmo em condições climáticas áridas (MOROCHO; VERDUGO, 2023; VILLAGRÁN; CASTRO, 2004).

Nas áreas analisadas, observa-se uma diversidade de geoformas sobre as quais são criadas as *terrazas*, com uma técnica análoga ao terraceamento sendo amplamente aplicada. Tanto as *terrazas* ancestrais quanto as mais recentes, como as *melgas*, são construídas em condições análogas de relevo, seja em regiões de topografia mais acidentada, como no Alto Loa, ou em áreas de relevo mais suavizado, como na região de San Pedro de Atacama.

Herdada dos povos pré-hispânicos, essa técnica constitui um elemento central para a viabilização da agricultura em ambientes desérticos. Para além dos benefícios agrícolas, o processo ancestral de construção das *terrazas* representa um dos pilares das práticas de manejo tradicional. Agricultores locais ressaltam a ancestralidade da terra e destacam que a construção das *terrazas*, assim como as técnicas a ela associadas, constituintes de um saber transmitido intergeracionalmente.

De acordo com González-Pizarro; Galeno-Ibaceta (2018), a construção de *terrazas* no Deserto do Atacama representa uma estratégia ancestral de manejo pedo-

hídrico que integra conhecimentos ecológicos e hidrológicos com práticas culturais indígenas. Essas *terrazas* permitem a prática agrícola em um ambiente árido por meio da captação e retenção da umidade, ao mesmo tempo em que refletem uma profunda conexão espiritual com a terra e um compromisso com a conservação ambiental.

A presença das *terrazas* influencia não apenas o uso do solo, mas também o desenho arquitetônico dos assentamentos, orientando a disposição das construções para otimizar o uso da água. Em escala local, provocam um redesenho da paisagem à medida que a topografia é completamente remodelada. Com o auxílio de tecnologias modernas, essas práticas vêm sendo aprimoradas, promovendo maior sustentabilidade e resiliência agrícola. Essa integração entre tradição e inovação evidencia o potencial dos conhecimentos ancestrais na adaptação frente às mudanças climáticas.

O manejo da água configura-se como um aspecto central no funcionamento das *terrazas*. A utilização da água de irrigação proveniente dos Andes, aplicada em solos previamente preparados com terra peneirada e esterco animal, contribui para a formação de uma assinatura pedológica distinta dos solos não cultivados do entorno, com estrutura mais bem desenvolvida, vide acréscimo de matéria orgânica e melhora na capacidade de retenção hídrica. Ademais, a estrutura física composta por rochas encaixadas na base e nas paredes das *terrazas* atua como um sistema de contenção, estabilizando o solo formado, evitando sua perda por erosão eólica. Esse conjunto de fatores é determinante para o êxito da atividade agrícola nessas áreas de clima árido.

Outras técnicas de manejo agrícola adotadas por esses povos também exercem influência significativa na saúde do solo e na manutenção da sustentabilidade observada. Práticas como a rotação de culturas, o pousio, o uso predominante de fertilizantes orgânicos de origem animal, a utilização de plantas adaptadas e sementes nativas transmitidas entre gerações, compõem um conjunto de estratégias de uma agricultura mais ecológica. Essas práticas visam promover o desenvolvimento agrícola de forma integrada à conservação dos ecossistemas locais, assegurando a resiliência dos sistemas produtivos frente às condições ambientais adversas.

A rotação de culturas promove a diversificação vegetal, que afeta positivamente a biodiversidade das comunidades microbianas do solo e contribui para a melhoria da estrutura do solo, da retenção de água e da dinâmica de carbono, além de reduzir a

necessidade de pesticidas (MALCOM, 2024; NAOREM et al., 2023; PLAXINA et al., 2022) e otimizar o uso de nutrientes, devido as diferentes demandas de cada cultivar. O cultivo de espécies como *Medicago spp.* (alfafa) também favorece a fixação biológica de nitrogênio, auxiliando na reposição de nutrientes e na fertilidade do solo (OLIVEIRA et al., 2004).

Associada a essa prática, o pousio desempenha papel central na regeneração natural das *terrazas* agrícolas ao permitir a ciclagem de nutrientes, reduzir a erosão, devido ao cobertura vegetal espontânea, e favorecer a atividade biológica do solo (LIN et al., 2023; PI et al., 2022; VAN SCHALKWYK et al., 2023). Ademais, a fertilização orgânica com esterco animal melhora as propriedades físico-químicas do solo ao incrementar a matéria orgânica e assegurar a liberação contínua de nutrientes, sobretudo em solos com baixa fertilidade e alta salinidade (LEHMANN et al., 2003; RESÉNDIZ-PAZ et al., 2013).

O uso de sementes nativas, selecionadas e preservadas por gerações, evidencia uma estratégia de resistência e seleção genética, através da adaptação ao clima árido e aos solos salinos da região (DENEVAN, 2001; GONZALES, 2000; JACOBSEN; MUJICA; ORTIZ, 2003; RAYNE; AULA, 2020). Essa prática, profundamente enraizada no saber dos povos pré-hispânicos, garante a manutenção de cultivares adaptados às condições locais, como o milho (*Zea mays*), a batata (*Solanum tuberosum*) e a quinoa (*Chenopodium quinoa*) (ROMO et al., 1999; SANDOR et al., 2022). Sendo que, após milênios de seleção, é provável que essas variedades apresentem tolerância à salinidade e à baixa disponibilidade hídrica, contribuindo não apenas para a segurança alimentar, mas também para a recuperação temporária de solos afetados por sais (DIEDHIOU et al., 2021; SILVA et al., 2023). Desse modo, o manejo agrícola tradicional revela-se não apenas eficaz, mas também resiliente frente às adversidades ambientais.

Porém, é impossível abordar essas técnicas sem considerar a cosmovisão dos povos sobre o espaço. Os povos pré-hispânicos do deserto acreditam que Pachamama, a deidade que representa a terra, deve ser reverenciada e respeitada. Essa visão espiritual influencia diretamente suas práticas agrícolas, reforçando a interdependência entre manejo produtivo e respeito ao território, como observa Madaleno (2012). Essa reverência à Pachamama, ocupa papel central na organização de suas práticas agrícolas e sociais. A divindade andina, mencionada em todas as

entrevistas, representa a terra e a água como entidades vivas e sagradas, responsáveis pela fertilidade e prosperidade (JENKINS, 2015; VILLAGRÁN; CASTRO, 2004). As oferendas e rituais com folhas de coca, vinho e outros elementos tradicionais expressam essa relação simbiótica. Isso reforça uma ética relacional com o ambiente que desafia perspectivas antropocêntricas (GALEANO, 2023; MALUF et al., 2017). Porém, a espiritualidade não se restringe ao campo simbólico, mas orienta uma prática agrícola sustentável, minimizando impactos ambientais e fortalecendo os laços comunitários, como observa MADALENO (2012) e VILLAGRÁN e CASTRO (2004). Contudo, essas práticas e seus significados estão cada vez mais ameaçados pelas mudanças globais, que incidem fortemente sobre padrões climáticos. Sendo que, as regiões ecologicamente sensíveis, como o deserto, são fortemente afetadas por esse panorama (DÁVALOS; PEREIRA FILHO, 2020; TOLA, 2018).

Entre os ritos que evidenciam essa integração entre espiritualidade e manejo do ambiente, é possível destacar a *limpia de canales*, apontada pelos entrevistados como uma importante prática. Mais do que a limpeza dos canais de irrigação propriamente dita, o ritual coletivo reafirma a sacralidade da água e da terra, estabelecendo conexões com o princípio filosófico do *buen vivir* baseado na convivência harmoniosa com a natureza (MOYANO; CRUZ; BUSTAMANTE, 2020; BOFF, 2009). Essa cerimônia reforça os direitos ancestrais sobre o uso da água e atua como uma prática política e identitária nos diversos povoados (YÁÑEZ; MOLINA, 2011). A identidade agrícola expressada pelos entrevistados está intimamente ligada a esse sistema de crenças e simbolismos, sendo resultado de uma longa história de adaptação ao ambiente árido, à qual se associam fatores como relevo, clima e o desenvolvimento demográfico desses povoados (POURRUT; NÚÑEZ, 1995).

A governança comunitária também é elemento central na organização sociopolítica desses povos. A atuação das *directivas*, responsáveis pela gestão dos recursos e pela mediação entre o povoado e agentes externos (Rivera, 1995) reflete uma lógica de decisão coletiva alinhada a essa cosmovisão andina que se baseia na ancestralidade e na transmissão intergeracional de saberes.

O conhecimento tradicional, que perpassa os rituais, o cultivo e o uso da água, oferece respostas valiosas para a adaptação às mudanças climáticas. Como destaca o relatório sobre desertificação do IPCC (MIRZABAEV et al., 2022), a resposta para a mitigação e adaptação aos efeitos das mudanças climáticas se encontra no

conhecimento indígena local, aqui, visto como o conhecimento tradicional dos povos pré-hispânicos, alinhados a práticas de manejo sustentável, como as apresentadas por todos os participantes. Tão logo, nesse cenário de aridez extrema, os conhecimentos ancestrais não apenas garantem a continuidade da vida agrícola, mas também constroem uma forma de existência enraizada na harmonia com o ambiente.

4.3. Indicadores nas *terrazas*, uma outra evidência das benesses do manejo.

Ao acrescentar ainda mais uma evidencia das práticas sustentáveis realizadas pelos povos pré-hispânicos do deserto, entram aqui as análises das frações físicas do carbono dos solos cultivados e não cultivados por esses povos. A partir destas análises pode se obter dados que indicam as benesses ocasionadas pelo manejo agrícola tradicional. Ao separar matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada aos minerais (MOAM), temos um panorama sobre como as práticas de manejo do solo, como as explicitadas no tópico anterior, influenciam na retenção de carbono no solo, reduzindo sua perda para atmosfera por oxidação (Malcom, 2024; Safruddin; Judijanto; Harsono, 2024) atuando como medida mitigatória dos efeitos das mudanças climáticas.

Os altos índices de MOAM indicam um sequestro de carbono mais eficiente, de longo prazo, refletindo processos avançados de estabilização e humificação da matéria orgânica (IWATA et al., 2021). Assim, a maior presença de MOAM nos solos cultivados sugere que a atividade agrícola dos povos tradicionais favorece a criação de solos com maior retenção de carbono. Entretanto, essa dinâmica também é influenciada pelas condições áridas do deserto, onde a baixa disponibilidade de umidade, devido à alta evapotranspiração, limita a atividade microbiana e a decomposição da MOAM (HECKMAN et al., 2023). A MOP evidencia que, no contexto desértico de baixíssimo aporte de matéria orgânica proveniente da vegetação natural, essa fração é substancialmente acrescida em função da agricultura desenvolvida por esses povos.

Os maiores teores de carbono total e nitrogênio total conversam com a influência do manejo exercido pelos povos pré-hispânicos, com relações C:N entre 13 e 24:1. Essa relação varia entre os povoados, refletindo diferenças nos processos de decomposição e estabilização da matéria orgânica. Valores entre 13 e 16:1 indicam uma maior liberação de nitrogênio, resultando em uma mineralização mais rápida do carbono e sua liberação na forma de CO₂. Já relações entre 16 e 20:1 sugerem um

equilíbrio entre decomposição e estabilização do carbono, favorecendo um bom potencial de sequestro. No povoado onde a relação C:N atinge 24:1, pode-se inferir uma decomposição mais lenta da matéria orgânica, permitindo maior retenção de carbono no solo e aumentando seu potencial de sequestro devido à taxa reduzida de mineralização.

Segundo Cantarella (2007), a relação C:N próxima de 20:1 é ideal, pois indica um equilíbrio entre a imobilização e a mineralização do nitrogênio. O estudo de Xiong et al. (2022) aponta que essa relação tende a diminuir em ambientes áridos, estando diretamente associada ao tipo de vegetação predominante e à biomassa vegetal disponível. Corroborando essa observação, Amorim et al. (2022) destacam a influência da baixa precipitação média anual na redução da relação C:N em solos sob condições climáticas áridas. Além disso, Cotrufo et al. (2021) relata que em regiões de clima seco, a menor incorporação de matéria orgânica, aliada a teores relativamente elevados de nitrogênio, resulta em baixas razões C:N. Ademais, Hao et al. (2020), em seu estudo sobre solos cultivados em ambientes desérticos, afirma que o uso de esterco animal e outras práticas de manejo contribuem para a permanência da matéria orgânica e a criação de estoques de carbono a longo prazo. Dessa forma, as práticas tradicionais de manejo podem elevar ainda mais os valores da relação C:N, auxiliando na mitigação das mudanças climáticas.

Além disso, os valores para pH entre CS e NCS variaram pouco, com CS apresentando pH mais elevado em Cupo, Socaire e Toconce, o que pode ser visto como um efeito do manejo agrícola com irrigação. No entanto, as variações são moderadas e isso sugere controle na alcalinização do solo pelas práticas do manejo, o que é positivo considerando o contexto de irrigação com águas advindas do degelo dos Andes. Com relação a EC, Ayquina mostrou uma queda acentuada na EC nos CS ($-117.325 \mu\text{S}/\text{cm}$), o que, apesar de um valor absoluto elevado, também sugere que a irrigação e o manejo não estão levando a uma salinização crescente, o que é positivo. Nos outros povoados, a EC não variou de forma tão pronunciada, indicando que o manejo auxilia no controle da salinidade.

Os valores de sódio trocáveis em Ayquina apresentam um aumento acentuado de Na nos CS ($+74,86 \text{ cmolc}/\text{dm}^3$), o que sugere um possível risco de sodificação, talvez devido à irrigação com água rica em sais ou o próprio material de origem dos solos. Nos outros povoados, os valores de Na são mais equilibrados, indicando menor

risco de sodificação e maior sustentabilidade do manejo agrícola nas *terrazas*. A maior CTC nos CS da maioria dos povoados sugere que o manejo agrícola está aumentando a capacidade de retenção de nutrientes e consequentemente a fertilidade do solo, o que é um sinal positivo de sustentabilidade. Ayquina, no entanto, apresenta uma queda acentuada na CTC, indicando possível lixiviação das bases do solo devido a irrigação e/ou uma exportação acentuada por parte das culturas.

Estudos indicam a presença de íons dissolvidos na água de degelo dos Andes, como Na, Ca, Mg, SO₄, CO₃ e outros, além de alterações na CE e no pH. Essa presença foi documentada em diversas regiões dos Andes, incluindo o Chile (POURRIER ET AL., 2014; SANDOR ET AL., 2022; IGNATOV E VALCHEVA, 2023), os Andes peruanos (MARK ET AL., 2005) e a porção argentina da cordilheira (LECOMTE ET AL., 2008). Isso ilumina sobre os valores encontrados de pH, Na, EC e quiçá t, sendo que, apesar de alterações preponderantes em Ayquina, muito devidas a suas condições hidrogeomorfológicas, pelo observado em campo, o cultivo ocorre assegurando a produção nesses locais, sendo talvez pela prática de uso de plantas adaptadas, sementes nativas que passam por gerações e principalmente pela ação de outros íons na substituição do Na nos sítios das argilas, impedindo uma salinização prejudicial, como visto no capítulo anterior.

Sobre os teores de carbono orgânico, os povoados apresentam para CS valores maiores TOC em relação aos NCS. Isso sugere que o manejo agrícola, com ações como a rotação de culturas, o uso de fertilizantes orgânicos e as outras técnicas por eles empregadas, estão aumentando o conteúdo de carbono orgânico no solo, sugerindo um indicativo positivo de sustentabilidade. Porém, a diminuição de TOC em Ayquina alarde para possível perda de matéria orgânica, que precisa ser monitorada.

5. CONCLUSÃO

Este estudo exploratório descreveu as práticas agrícolas de manejo do solo e da água empregadas por agricultoras e agricultores *Lican Antai* no Deserto do Atacama, elucidando como o conhecimento tradicional molda sistemas agrícolas em um dos ambientes mais áridos do mundo.

1. Práticas de manejo da água: Os resultados revelam técnicas sofisticadas adaptadas às condições locais. As práticas de gestão da água, desenvolvidas ao longo de gerações, incluem sistemas de irrigação estratégicos e estruturas de

governança comunitária que permitiram a produção agrícola apesar da disponibilidade hídrica limitada.

2. Práticas de manejo do solo: As técnicas incluem terraceamento, rotação de culturas, seleção genética, períodos de pousio sazonal e fertilização orgânica com esterco animal, representando conhecimento empírico acumulado que promove a sustentabilidade agrícola.

3. Evidências científicas da qualidade do solo: O fracionamento físico da matéria orgânica evidenciou que as práticas tradicionais contribuem para a melhoria da estrutura e fertilidade do solo através da retenção de carbono, demonstrado pela maior presença de MOAM nos solos agricultados, relações carbono-nitrogênio favoráveis, valores estáveis de pH e EC, e variações otimistas nos indicadores como Na trocável, t e TOC.

4. Dimensão cultural e social: O manejo agrícola *Lican Antai* integra visões de mundo culturais que orientam a gestão dos recursos. A reverência à Pachamama e rituais como a *limpia de canales* estabelecem um quadro ético para tomada de decisões. As estruturas de governança comunitária facilitam a gestão coletiva de recursos compartilhados, demonstrando como organização social apoia a sustentabilidade agrícola

5. Desafios atuais: Essas práticas tradicionais enfrentam pressões crescentes por mudanças globais (alterações no clima, atrativos urbanos, atividade mineradora), particularmente pela diminuição da precipitação, aumento das temperaturas e padrões climáticos mais erráticos que impactam os regimes hidrológicos dos quais a agricultura *Lican Antai* depende.

6. REFERENCIAS

AMORIM, H. C. S. et al. C:N ratios of bulk soils and particle-size fractions: Global trends and major drivers. **Geoderma**, v. 425, nov. 2022.

ARCE, A.; CHARÃO-MARQUES, F. Desenvolvimento, materialidades e o ator social: orientações metodológicas para aproximações territoriais. **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 29, n. 1, p. 40–65, fev. 2021.

BALDIN, N.; MUNHOZ, E. M. B. Educação Ambiental Comunitária: Uma Experiência Com A Técnica De Pesquisa Snowball (Bola De Neve). **REMEA - Revista Eletrônica Do Mestrado Em Educação Ambiental**, v. 27, 2012.

BARRERA-BASSOLS, N.; ZINCK, J. A. Ethnopedology: a worldwide view on the soil knowledge of local people. **Geoderma**, v. 111, n. 3–4, p. 171–195, fev. 2003.

BOFF, L. ¿Vivir mejor o «el buen vivir»? **América Latina en Movimiento**, Agência Latino-Americana de Informação, 23 mar. 2009.

BOISIER, J. P. et al. Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. **Elementa: Science of the Anthropocene**, v. 6, jan. 2018.

BOZKURT, D. et al. Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. **Climatic Change**, v. 150, n. 3–4, p. 131–147, out. 2018.

BRASIL. Conselho Nacional de Saúde. **Norma Operacional nº 001/2013**. Brasília, DF, 2013.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 422–423.

CARRASCO, Anita. A biography of water in Atacama, Chile: two indigenous community responses to the extractive encroachments of mining. **The Journal of Latin American and Caribbean Anthropology**, v. 21, n. 1, p. 130–150, 2016.

CEPAL. **Balanço preliminar das economias da América Latina e do Caribe 2023**. Santiago: Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), 2023.

CHILE. Ley n.º 19.253, de 28 de setembro de 1993. **Establece normas sobre protección, fomento y desarrollo de los indígenas, y crea la Corporación Nacional de Desarrollo Indígena**. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, 5 out. 1993.

CLARKE, J. D. A. Antiquity of aridity in the Chilean Atacama Desert. **Geomorphology**, v. 73, n. 1–2, p. 101–114, jan. 2006.

COTRUFO, F. M. et al. A hierarchical framework to understand and predict soil carbon storage and nitrogen recycling. **Global Change Biology**, v. 27, n. 19, p. 4465–4468, out. 2021.

CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D. **Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches**. [s.l.]: Sage Publications, 2017.

DENEVAN, W. M. **Cultivated landscapes of native Amazonia and the Andes**. Oxford: Oxford University Press, 2001.

DIAS, R.; MATOS, F. Impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos: desafios e implicações para a humanidade. **Revista Sociedade Científica**, v. 6, n. 1, set. 2023.

DIEDHIU, I. et al. Effects of different temperatures and water stress on germination and initial growth of creole genotypes of maize from three different agroclimatic regions of San Luis Potosí (México). **Maydica**, abr. 2021.

GALEANO, M. F. Á. Ética y justicia por la Pachamama: a propósito de Derechos de la naturaleza, de Eduardo Gudynas. **Killkana Social**, v. 7, n. 2, p. 1–6, maio 2023.

GAYO, E. M. et al. Hydroclimate variability in the low-elevation Atacama Desert over the last 2500 yr. **Climate of the Past**, v. 8, n. 1, p. 287–306, fev. 2012.

GJORUP, D. F. et al. Pedoclimate monitoring in the periglacial high mountain soils of the Atacama Desert, northern Chile. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 30, n. 4, p. 310–329, out. 2019.

GONZALES, T. A. The Cultures of the Seed in the Peruvian Andes. In: **Genes in the Field: On-farm Conservation of Crop Diversity**. Ottawa: International Development Research Centre, 2000.

GONZÁLEZ-PIZARRO, J. A.; GALENO-IBACETA, C. Natural and Cultural Landscapes in Atacama Desert: Between Tradition and Innovation. In: **Landscape Architecture - The Sense of Places, Models and Applications**. [s.l.]: InTech, 2018.

HAO, X. et al. Enhancement of no-tillage, crop straw return and manure application on field organic matter content overweigh the adverse effects of climate change in the arid and semi-arid Northwest China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 295, p. 108199, dez. 2020.

HECKMAN, K. A. et al. Moisture-driven divergence in mineral-associated soil carbon persistence. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 120, n. 7, fev. 2023.

IGNATOV, I.; VALCHEVA, N. Physicochemical, isotopic, spectral, and microbiological analyses of water from glacier mappu, Chilean Andes. **Journal of the Chilean Chemical Society**, v. 68, p. 5802-6, 2023. doi: 10.4067/S0717-97072023000105802.

IMFELD, N. et al. A combined view on precipitation and temperature climatology and trends in the southern Andes of Peru. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 1, p. 679–698, jan. 2021.

IWATA, B. D. F. et al. Total and particulate contents and vertical stratification of organic carbon in agroforestry system in caatinga. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 2, p. 443–451, jun. 2021.

JACOBSEN, S. E.; MUJICA, A.; ORTIZ, R. The global potential for quinoa and other Andean crops. **Food Reviews International**, v. 19, n. 1–2, p. 139–148, 2003.

JENKINS, K. Unearthing Women's Anti-Mining Activism in the Andes: Pachamama and the "Mad Old Women". **Antipode**, v. 47, n. 2, p. 442–460, mar. 2015.

KIM, S. et al. Linking Total Precipitable Water to Precipitation Extremes Globally. **Earth's Future**, v. 10, n. 2, fev. 2022.

LECOMTE, K. L. et al. Hydrochemical appraisal of ice- and rock-glacier meltwater in the hyperarid Agua Negra drainage basin, Andes of Argentina. **Hydrological Processes**, v. 22, p. 2180-95, 2008. doi: 10.1002/hyp.6816.

LEHMANN, J. et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, n. 2, p. 343–357, 2003.

LIMONGI, J. E. et al. Estrutura e processos da Vigilância em Saúde em municípios mineiros: uma análise quali-quantitativa. **Cadernos Saúde Coletiva**, v. 25, n. 1, p. 31–44, mar. 2017.

LIN, Y. et al. How to Improve the Benefits of Short-Term Fallow on Soil Physicochemical and Microbial Properties: A Case Study from the Yellow River Delta. **Land**, v. 12, n. 7, p. 1426, jul. 2023.

MADALENO, I. M. Desertificação no Norte do Chile. **Finisterra**, v. 42, n. 83, dez. 2012.

MAESTRE, F. T. et al. Biogeography of global drylands. **New Phytologist**, v. 231, n. 2, p. 540–558, jul. 2021.

MALCOM, A. Integrating Indigenous Knowledge into Livestock Policy Formulation. **International Journal of Livestock Policy**, v. 3, n. 1, p. 30–42, jun. 2024.

MALUF, F. et al. La naturaleza como sujeto de derechos: análisis bioético de las Constituciones de Ecuador y Bolivia. **Revista Latinoamericana de Bioética**, v. 18, n. 34–1, p. 155–171, nov. 2017.

MARK, B. G.; MCKENZIE, J. M.; GÓMEZ, J. Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejon de Huaylas, Peru / Evaluation hydrochimique de la contribution évolutive de la fonte glaciaire à l'écoulement fluvial: Callejon de Huaylas, Pérou. **Hydrological Sciences Journal**, v. 50, 2005. doi: 10.1623/hysj.2005.50.6.975.

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN Y COOPERACIÓN (Chile). **Ley Indígena 19.253: Establece Normas sobre Protección, Fomento y Desarrollo de los Indígenas**. Santiago: Publibey, 1993.

MINVIELLE, M.; GARREAUD, R. D. Projecting rainfall changes over the South American Altiplano. **Journal of Climate**, v. 24, n. 17, p. 4577–4583, set. 2011.

MIRZABAEV, A. et al. Desertification. In: **Climate Change and Land**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. p. 249–344.

MOROCHO, A. DE J. Z.; VERDUGO, M. A. N. Arqueología de Tambo Blanco (San Lucas): percepciones y significados del patrimonio. **Antropología Cuadernos de investigación**, n. 27, p. 82–97, mar. 2023.

MOYANO, R.; CRUZ, J.; BUSTAMANTE, P. El canto del agua y la voz de las montañas en Socaire, norte de Chile. **Bulletin de l'Institut français d'études andines**, n. 49 (3), p. 443–465, dez. 2020.

NAGY, B. et al. Surface hydrology on the highest volcano of the high Dry Andes, the Ojos del Salado; interannual fluctuations and moisture sources. **Journal of Hydrology**, v. 653, p. 132741, jun. 2025.

NAOREM, A. et al. Soil Constraints in an Arid Environment—Challenges, Prospects, and Implications. **Agronomy**, v. 13, n. 1, p. 220, jan. 2023.

NOGUEIRA-MARTINS, M. C. F.; BÓGUS, C. M. Considerações sobre a metodologia qualitativa como recurso para o estudo das ações de humanização em saúde. **Saúde e Sociedade**, v. 13, p. 44–57, 2004.

OIT - ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO. **Convenção nº 169 sobre Povos Indígenas e Tribais**. Genebra, 1989.

OLIVEIRA, W. S. DE et al. Alfalfa yield and quality as function of nitrogen fertilization and symbiosis with *Sinorhizobium meliloti*. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 4, p. 433–438, 2004.

PABÓN-CAICEDO, J. D. et al. Observed and Projected Hydroclimate Changes in the Andes. **Frontiers in Earth Science**, v. 8, p. 506439, mar. 2020.

PARCERO-OUBIÑA, C. et al. Ground to air and back again: Archaeological prospection to characterize prehispanic agricultural practices in the high-altitude Atacama (Chile). **Quaternary International**, v. 435, p. 98–113, abr. 2017.

PI, H. et al. Performance of the single-event wind erosion evaluation program (SWEEP) model in assessing the impact of crop rotation, green manure, fertilizer, and tillage on wind erosion. **Land Degradation & Development**, v. 33, n. 11, p. 1787–1798, jul. 2022.

PLAXINA, V. S. et al. Improvement of the ecological sustainability of short-term rotation under the aridization conditions. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 949, n. 1, p. 012135, jan. 2022.

POURRIER, J. et al. Glacier meltwater flow paths and storage in a geomorphologically complex glacial foreland: The case of the Tapado glacier, dry Andes of Chile (30°S). **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1068-83, 2014. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.023.

POURRUT, P.; NÚÑEZ, L. El agro y la identidad atacameña: entre la crisis y la esperanza. In: **Agua, ocupación del espacio y economía campesina en la región atacameña**. 1. ed. Antofagasta: [s.n.], [s.d.]. p. 107–110.

RAYMENT, G. E.; LYONS, D. J. **Soil chemical analysis methods**: Australia. Collingwood: CSIRO Publishing, 2011.

RAYNE, N.; AULA, L. Livestock Manure and the Impacts on Soil Health: A Review. **Soil Systems**, v. 4, n. 4, p. 64, out. 2020.

RESÉNDIZ-PAZ, M. DE LA L. et al. Local soil knowledge and management of Anthrosols: A case study in Teoloyucan, Mexico. **Geoderma**, v. 193–194, p. 41–51, fev. 2013.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and Improvement of United States Salinity Laboratory Staff**. [s.l.: s.n.], 1954.

RIVERA, F. El contexto histórico y social del manejo de los recursos agropecuarios en los oasis de San Pedro de Atacama. In: POURRUT, P.; NÚÑEZ, L. (Eds.). **Agua, ocupación del espacio y economía campesina en la región atacameña**. 1. ed. Antofagasta: [s.n.], [s.d.]. p. 61–77.

ROMO, M. et al. La Transición Entre Las Tradiciones De Los Oasis Del Desierto Y De Las Quebradas Altas Del Loa Superior: Etnobotánica Del Valle Del Río Grande, 2a Región, Chile. **Chungará (Arica)**, v. 31, n. 2, dez. 1999.

SAFRUDDIN, S.; JUDIJANTO, L.; HARSONO, I. Bibliometric Analysis of the Effect of Sustainable Agricultural Practices on Farmers' Economic Sustainability. **West Science Interdisciplinary Studies**, v. 2, n. 01, p. 208–215, jan. 2024.

SANDOR, J. A. et al. Soils in ancient irrigated agricultural terraces in the Atacama Desert, Chile. **Geoarchaeology**, v. 37, n. 1, p. 96–119, jan. 2022.

SANDOR, J. A.; HOMBURG, J. A. Anthropogenic Soil Change in Ancient and Traditional Agricultural Fields in Arid to Semiarid Regions of the Americas. **Journal of Ethnobiology**, v. 37, n. 2, p. 196, jul. 2017.

SENRA, E. O. et al. Holocene pedogenesis along a chronotoposequence of soils from the Altiplano to the Cordillera Real, Bolivian Andes. **CATENA**, v. 178, p. 141–153, jul. 2019.

SILVA, R. M. et al. Tolerance of alfafa varieties subjected to salinity. **Irriga**, v. 28, n. 1, p. 1–21, 2023.

TAPIA, J. et al. Geology and geochemistry of the Atacama Desert. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 111, n. 8, p. 1273–1291, ago. 2018.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TOLA, M. Between Pachamama and Mother Earth: Gender, Political Ontology and the Rights of Nature in Contemporary Bolivia. **Feminist Review**, v. 118, n. 1, p. 25–40, abr. 2018.

TOLEDO, O. et al. Comparison of elevation-dependent warming and its drivers in the tropical and subtropical Andes. **Climate Dynamics**, v. 58, n. 11–12, p. 3057–3074, jun. 2022.

TREACY, J. M. **Las chacras de Coporaque: andenería y riego en el valle del Colca**. Lima: Instituto de Estudios Peruanos, 1994.

TRONCOSO, A. et al. Maquetas inkaicas en Chiu-Chiu: paisaje y ritualidad agraria en el desierto de Atacama. **Estudios Atacameños**, n. 63, p. 3–23, out. 2019.

VAN SCHALKWYK, R. et al. Soil water dynamics and biomass production of young rooibos (*Aspalathus linearis*) plants. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 15154, set. 2023.

VAZQUEZ, J. L. Terceiro Polo: desafios climáticos e consequências globais. **Dataset Reports**, v. 3, n. 1, p. 178–182, nov. 2024.

VILLAGRÁN, C.; CASTRO, V. **Ciencia indígena de los Andes del norte de Chile**. Santiago: Editorial Universitaria, 2004.

XIONG, J. et al. Variation in plant carbon, nitrogen and phosphorus contents across the drylands of China. **Functional Ecology**, v. 36, n. 1, p. 174–186, jan. 2022.

YÁÑEZ, N.; MOLINA, R. Los pueblos Indígenas y el agua. In: **Las aguas indígenas en Chile**. 1. ed. Santiago: LOM, 2011. p. 13–64.

CONCLUSÃO GERAL

Esta dissertação partiu da incógnita de como uma agricultura próspera pôde florescer e persistir no Deserto do Atacama, o ambiente mais árido da Terra. A resposta, conforme demonstrado ao longo desta pesquisa, reside interação milenar entre a engenhosidade humana e a paisagem em um processo que transformou o substrato desértico em solos férteis e resilientes. Ao articular uma análise de parâmetros químicos, físicos e mineralógicos (Capítulo 1) com uma investigação descritiva baseada nos preceitos da etnopedológica sobre os saberes e práticas de comunidades do deserto (Capítulo 2), este estudo se aprofundou no sistema socioecológico *Lican Antai*, revelando que os solos manejados não são meramente um recurso, mas um arquivo cultural e tecnológico vivo.

O primeiro capítulo estabeleceu a base material dessa transformação, confirmando que os Anthrosols das *terrazas* atacamenhas são o resultado direto de três ações fundamentais de antrossolização: a engenharia de construção das *terrazas*, que otimizou a textura do solo; o manejo da irrigação com águas de degelo andino, que regulou a química do solo de forma a evitar a salinidade deletéria; e a adição contínua de matéria orgânica, que enriqueceu os níveis de carbono e nitrogênio. A comparação analítica entre os solos cultivados e os não manejados demonstrou que as práticas agrícolas foram fatores decisivos para a diferenciação das propriedades desses solos em relação à sua matriz natural.

Contudo, a materialidade dos solos é inseparável do conhecimento que a governa. O segundo capítulo, alicerçado na Etnopedologia, demonstrou que as práticas de manejo do solo e da água dos agricultores e agricultoras *Lican Antai* são a expressão de um sistema de conhecimento complexo e adaptativo. A pesquisa revelou que as técnicas de rotação de culturas, seleção genética e fertilização orgânica (*praxis*) são guiadas por um profundo entendimento ecológico (*corpus*) e enraizadas em uma cosmovisão (*cosmos*) que posiciona a comunidade como guardiã de recursos comuns, sob a égide ética de Pachamama e de rituais como a *limpia de canales*. Fica evidente, portanto, que a resiliência do sistema não reside apenas nas estruturas de pedra, mas na organização social e no saber local que as mantêm vivas.

Ao responder como essa agricultura se estabeleceu, a dissertação também confrontou a sua vulnerabilidade atual. O legado de resiliência *Lican Antai*,

construído em harmonia com os ciclos hídricos do deserto, enfrenta hoje uma ameaça sem precedentes decorrente das mudanças climáticas globais, que alteram o regime de degelo andino, e das pressões socioeconômicas. A pesquisa válida a urgência expressa na introdução: entender e valorizar estes sistemas é crucial não apenas para a salvaguarda do patrimônio cultural, mas para a própria segurança hídrica e alimentar das comunidades que deles dependem.

Tão logo, esta dissertação cumpre seu objetivo ao oferecer um diálogo fundamental entre o conhecimento científico e o conhecimento tradicional. Os sistemas agrícolas *Lican Antai* emergem não como relíquias do passado, mas como um repositório de lições valiosas para um futuro que exige modelos de produção de alimentos mais sustentáveis e estratégias de adaptação eficazes. Ao desvendar a íntima conexão entre solo, cultura e resiliência no Atacama, este trabalho reforça que as soluções para os desafios socioecológicos contemporâneos demandam uma abordagem integrada, que reconheça e respeite a legitimidade dos saberes dos povos que, há milênios, fazem do extremo a sua morada.