

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

INSTITUT DES SCIENCES DE LA TERRE D'ORLÉANS

THÈSE

présentée par :

Gerardo SOTO

soutenue le : **15 juillet 2009**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : Sciences du sol

Statut organique des sols en milieu aride : étude de la région de Coquimbo (Chili).

THÈSE dirigée par :

M Ary BRUAND
M Jean-Robert DISNAR

Professeur, ISTO Université d'Orléans
Directeur de Recherche, CNRS ISTO Orléans

RAPPORTEURS :

M Michel BROSSARD
M Pablo ALVAREZ

Directeur de Recherche, IRD Montpellier
Professeur, Université de La Serena-CEAZA - Chili

JURY :

M Pablo ALVAREZ
M Jean-Robert DISNAR
M Sébastien SALVADOR
M Michel BROSSARD

Professeur, Univ. de La Serena-CEAZA - Chili Président du jury
Directeur de Recherche, CNRS ISTO Orléans
Maître de Conférences, Université François Rabelais Tours
Directeur de Recherche, IRD Montpellier

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	11
CHAPITRE I.....	17
I. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE	19
I.1. LA FRANGE LITTORALE	22
I.2. LES VALLEES FLUVIALES.....	23
I.3. LA MOYENNE MONTAGNE OU INTERFLEUVES	24
I.4. LA HAUTE CORDILLERE	25
II. LE CADRE GEOLOGIQUE	26
III. LES SOLS.....	28
III.1. LES REGIONS DESERTIQUES	28
III.2. LES REGIONS ARIDES ET SEMI-ARIDES	30
III.3. LA REGION CENTRALE	31
III.4. LES SOLS DE LA REGION CENTRE-SUD.....	33
III.5. LES SOLS DE LA REGION SUD	35
III.6. LES SOLS DE LA REGION DE COQUIMBO.....	35
IV. LE CLIMAT.....	38
V. OBJECTIF ET ORGANISATION DE L'ETUDE.....	43
CHAPITRE II	45
I. LAS CARDAS	48
II. TALHUEN.....	50
III. FLOR DEL NORTE.....	52
IV. CAMARICO.....	53
V. EL PALQUI.....	54
VI. SAN PEDRO DE PICHASCA	56
VII. LAS RAMADAS	58
CHAPITRE III.....	61
I. LES SOLS ETUDIES POUR CHAQUE SITE.....	63
II. DESCRIPTION DES PROFILS DE SOLS	65
III. DENSITE APPARENTE.....	66
IV. TENEUR EN ELEMENTS GROSSIERS.....	66
V. GRANULOMETRIE ET ELEMENTS GROSSIERS	66
VI. CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE (CEC).....	67
VII. LA PYROLYSE ROCK-EVAL	67
VII.1. PRINCIPE	67
VII.2. METHODE	68
VII.2.a. Première phase	68
VII.2.b. Deuxième phase	68
VII.2.c. Troisième phase	68
VII.3. DEFINITION DES PARAMETRES	69
VII.3.a. Les paramètres initiaux	70
VII.3.b. Les paramètres usuels.....	71

VII.3.c. Le paramètre R400	72
CHAPITRE IV	75
I. LES SOLS DES SITES ETUDIES.....	77
I.1. LAS CARDAS	77
I.1.a. Le secteur sans usage.....	78
I.1.b. Le secteur sous usage extensif.....	79
I.1.c. Le secteur sous usage intensif.....	80
I.2. ZONE DE TALHUEN.....	85
I.2.a. Le secteur sans usage.....	85
I.2.b. Le secteur sous usage intensif.....	86
I.3. LA ZONE DE FLOR DEL NORTE.....	88
I.3.a. Le secteur sans usage.....	89
I.3.b. Le secteur sous usage intensif.....	90
I.4. LA ZONE DE CAMARICO	93
I.5. ZONE D'EL PALQUI	97
I.6. ZONE DE SAN PEDRO DE PICHASCA.....	100
I.6.a. Le secteur sans usage.....	100
I.6.b. Le secteur sous usage extensif.....	101
I.6.c. Le secteur sous usage intensif.....	101
I.7. ZONE DE LAS RAMADAS	105
I.7.a. Le secteur sans usage.....	106
I.7.b. Le secteur sous usage extensif.....	106
I.7.c. Le secteur sous usage intensif.....	106
II. CONCLUSIONS	111
CHAPITRE V.....	113
I. ANALYSE QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA MATIERE ORGANIQUE DES SOLS DE LAS CARDAS ET IMPACT DE DIFFERENTS USAGES DES TERRES	115
I.1. GENERALITES.....	115
I.2. TENEURS EN MATIERE ORGANIQUE (MO) DES SOLS DE LA ZONE DE LAS CARDAS ET EVOLUTION DANS LES PROFILS	116
I.3. QUALITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	118
I.4. INFLUENCE DE L'USAGE DES SOLS SUR LA QUALITE ET LA QUANTITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	124
I.5. CONCLUSIONS SUR LA ZONE DE LAS CARDAS	126
II. ÉVOLUTION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LA ZONE DE TALHUEN	127
II.1. GENERALITES.....	127
II.2. TENEURS EN MATIERE ORGANIQUE (MO) DES SOLS DE LA ZONE DE TALHUEN ET EVOLUTION DANS LES PROFILS	127
II.3. QUALITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	129
II.4. INFLUENCE DE L'USAGE DES SOLS SUR LA QUALITE ET LA QUANTITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	131
II.5. CONCLUSIONS SUR LA ZONE DE TALHUEN.....	132
III. ANALYSE QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA MATIERE ORGANIQUE DES SOLS DE FLOR DEL NORTE ET IMPACT DE DIFFERENTS USAGES DES TERRES	133
III.1. GENERALITES.....	133
III.2. TENEURS EN MATIERE ORGANIQUE (MO) DES SOLS DE LA ZONE DE FLOR DEL NORTE ET EVOLUTION DANS LES PROFILS	133
III.3. QUALITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	135
III.4. INFLUENCE DE L'USAGE DES SOLS SUR LA QUALITE ET LA QUANTITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	137

III.5.	CONCLUSIONS SUR LA ZONE DE FLOR DEL NORTE.....	139
IV.	ÉVOLUTION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA MATIERE ORGANIQUE DE LA ZONE DE CAMARICO.....	140
IV.1.	GENERALITES.....	140
IV.2.	TENEURS EN MATIERE ORGANIQUE (MO) DES SOLS DE LA ZONE DE CAMARICO ET EVOLUTION DANS LES PROFILS	140
IV.3.	QUALITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	140
IV.4.	INFLUENCE DE L'USAGE DES SOLS SUR LA QUALITE ET LA QUANTITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	143
IV.5.	CONCLUSIONS SUR LA ZONE DE CAMARICO	144
V.	ÉVOLUTION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA MATIERE ORGANIQUE EL PALQUI.....	146
V.1.	GENERALITES.....	146
V.2.	TENEURS EN MATIERE ORGANIQUE (MO) DES SOLS DE LA ZONE D'EL PALQUI ET EVOLUTION DANS LES PROFILS	146
V.3.	QUALITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	147
V.4.	INFLUENCE DE L'USAGE DES SOLS SUR LA QUALITE ET LA QUANTITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	149
V.5.	CONCLUSIONS SUR LA ZONE D'EL PALQUI	150
VI.	ÉVOLUTION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA MATIERE ORGANIQUE DE LA ZONE DE SAN PEDRO DE PICHASCA.....	151
VI.1.	GENERALITES.....	151
VI.2.	TENEURS EN MATIERE ORGANIQUE (MO) DES SOLS DE LA ZONE DE SAN PEDRO DE PICHASCA ET EVOLUTION DANS LES PROFILS	151
VI.3.	QUALITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	153
VI.4.	INFLUENCE DE L'USAGE DES SOLS SUR LA QUALITE ET LA QUANTITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	155
VI.5.	CONCLUSIONS SUR LA ZONE DE SAN PEDRO DE PICHASCA.....	156
VII.	ÉVOLUTION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA MATIERE ORGANIQUE DE LA ZONE DE LAS RAMADAS.....	157
VII.1.	GENERALITES	157
VII.2.	TENEURS EN MATIERE ORGANIQUE (MO) DES SOLS DE LA ZONE DE LAS RAMADAS ET EVOLUTION DANS LES PROFILS	157
VII.3.	QUALITE DE LA MATIERE ORGANIQUE.....	159
VII.4.	INFLUENCE DE L'USAGE DES SOLS SUR LA QUALITE ET LA QUANTITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	161
VII.5.	CONCLUSIONS SUR LA ZONE DE LAS RAMADAS	162
VIII.	CONCLUSIONS GENERALES.....	163
CHAPITRE VI.....		165
I.	METHODE DE CALCUL DES STOCKS DE CARBONE.....	167
II.	MODELISATION DES RAPPORTS SURFACE-PROFONDEUR STOCKS DE CARBONE	168
III.	STOCK DE CARBONE DE LA ZONE DE LAS CARDAS	168
III.1.	DISTRIBUTION DU CARBONE ORGANIQUE TOTAL COT_s ET DES STOCKS DE CARBONE ORGANIQUE TOTAL ($SCOT_s$) EN PROFONDEUR	168
III.2.	PREDICTION DES $SCOT_s$	171
III.3.	CONCLUSION DES ESTIMATIONS A LAS CARDAS.....	173
IV.	STOCK DE CARBONE DE LA ZONE INTERMEDIAIRE (TALHUEN–FLOR DEL NORTE) ..	174
IV.1.	DISTRIBUTION DU CARBONE ORGANIQUE TOTAL COT_s ET DES STOCKS DE CARBONE ORGANIQUE TOTAL ($SCOT_s$) EN PROFONDEUR	174

IV.2.	PREDICTION DES $SCOT_S$	177
IV.3.	CONCLUSION DES ESTIMATIONS DANS LA ZONE INTERMEDIAIRE.....	179
V.	STOCK DE CARBONE DE LA ZONE DE LAS RAMADAS.....	180
V.1.	DISTRIBUTION DU CARBONE ORGANIQUE TOTAL COT_S ET DES STOCKS DE CARBONE ORGANIQUE TOTAL ($SCOT_S$) EN PROFONDEUR	180
V.2.	PREDICTION DES $SCOT_S$	184
V.3.	CONCLUSION DES ESTIMATIONS A LAS RAMADAS.....	185
VI.	CONCLUSIONS GENERALES DU CHAPITRE	186
	DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION.....	187
	REFERENCES.....	197
	TABLES DES FIGURES ET TABLEAUX.....	207
	ANNEXE ARTICLE.....	217

INTRODUCTION

Introduction

Le sol est le plus important réservoir de carbone organique de la biosphère (Jobbágy et Jackson, 2000). Le stock de carbone total mondial est estimé entre 2157 à 2293 Pg entre la surface et 1 m de profondeur (Batjes, 1996 ; Schulze, 2005). Le stock de carbone organique est quant à lui estimé entre 684 à 724 Pg dans les premiers 30 cm, entre 1462 à 1548 Pg entre la surface et 1 m de profondeur et entre 2376 à 2456 Pg entre la surface et 2 m de profondeur (Batjes, 1996 ; IPCC, 2001).

Les quantités de carbone organique présent dans les sols mais aussi la nature de la matière organique présente sont directement liées à la biomasse végétale produite et à l'usage qui en est fait par l'homme. La matière organique a une forte influence sur la quantité et la disponibilité des nutriments, le pH, la capacité d'échange cationique (CEC), la structure et la porosité des sols (Martinez *et al.*, 2008 ; Carter, 1990 ; Malamoud *et al.*, 2009). Sa distribution en surface et en profondeur a été largement étudiée (e.g. Bernoux *et al.*, 1998; Batjes, 2000; Arrouays *et al.*, 2001; Conant, 2002 ; Scott, *et al.*, 2002; Asner *et al.*, 2003; Lemenih and Itanna, 2004 ; Bernoux *et al.*, 2006 ; Nyssen *et al.*, 2008 ; Don *et al.*, 2007).

Néanmoins, les études concernant la relation entre les caractéristiques de la matière organique du sol et l'usage des terres en régions arides ou semi-arides sont rares. Hernanz *et al.* (2002) ont étudié les effets à long terme de l'activité agricole dans une région méditerranéenne semi-aride de l'Espagne. De la même manière, Conant *et al.* (1998) ont étudié les stocks et flux de carbone organique dans le nord de l'Arizona, puis Sherestha *et al.* (2008) ont analysé le carbone organique des sols dans un écosystème de steppe du Wyoming au sud des Etats-Unis. Feng *et al.* (2002) ont estimé le carbone organique des sols de la région aride du bassin Junggar en Chine.

Si certaines études ont concerné l'Amérique du Sud, peu semblent avoir concerné les zones arides et semi arides de ce continent. Ainsi, les études menées au Chili se sont concentrées dans la zone subtropicale (sud du pays), et principalement sur des sols d'origine volcaniques (Alfisol, Andisol, Inceptisol et Ultisol) (Aguilera *et al.*, 1997 ; Matus et Maire, 2000 ; Zagal *et al.*, 2002 ; Zagal et Córdova, 2005 ; Ellies *et al.*, 2005 ; Heredia *et al.*, 2007 ; Martinez *et al.*, 2008, Muñoz *et al.*, 2008 ; Stolpe *et al.*, 2008). En revanche, les écosystèmes semi-arides et arides du Chili (nord du pays), particulièrement sensibles à toute forme d'activité humaine, n'ont encore fait l'objet d'aucune étude susceptible d'aider à y appréhender l'impact de l'utilisation des sols sur le statut organique des sols ainsi que celui d'un éventuel changement climatique sur ce même statut organique. Masto *et al.* (2008) ; Noellemeyer *et al.* (2008) ; Piccolo *et al.* (2008) et Tiessen *et al.* (1998) ont étudié le rapport entre matière organique et différents modes d'usage dans différents écosystèmes arides du globe. Ce constat peut d'ailleurs être assez largement étendu à de nombreuses régions arides du globe qui n'ont pas été l'objet de nombreuses études jusqu'à présent.

La région de Coquimbo au Chili (30° S), frontière sud du désert d'Atacama, possède un climat du type « méditerranéen aride inférieur » (Caviedes et Dadget, 1984) avec une pluviométrie moyenne qui varie entre 60 et 240 mm sur un axe nord-sud. Cette région renferme par ailleurs la plus grande surface irriguée du nord du pays avec environ 100.000 ha (Álvarez *et al.*, 1999).

Les sols de cette région sont soumis à des usages très contrastés : (i) un secteur irrigué lieu d'une agriculture moderne tournée vers les marchés internationaux, (ii) un secteur irrigué lieu d'une agriculture traditionnelle tournée vers le marché intérieur, et (iii) un secteur non irrigué qui comprend des surfaces marginales et érodées.

Dans un tel contexte, nous nous proposons d'étudier le statut organique des sols en relation avec leur usage. Pour y parvenir, nous envisagerons autant les aspects quantitatifs que qualitatifs, et cela en faisant varier l'usage des sols ainsi que leur localisation le long d'un transect régional ouest-est.

CHAPITRE I

CONTEXTE ET OBJECTIF D'ETUDE

Ce chapitre présente les contextes géographique, géologique et pédologique de la région de Coquimbo, Chili. Les objectifs et l'organisation de l'étude seront décrit à la fin du chapitre.

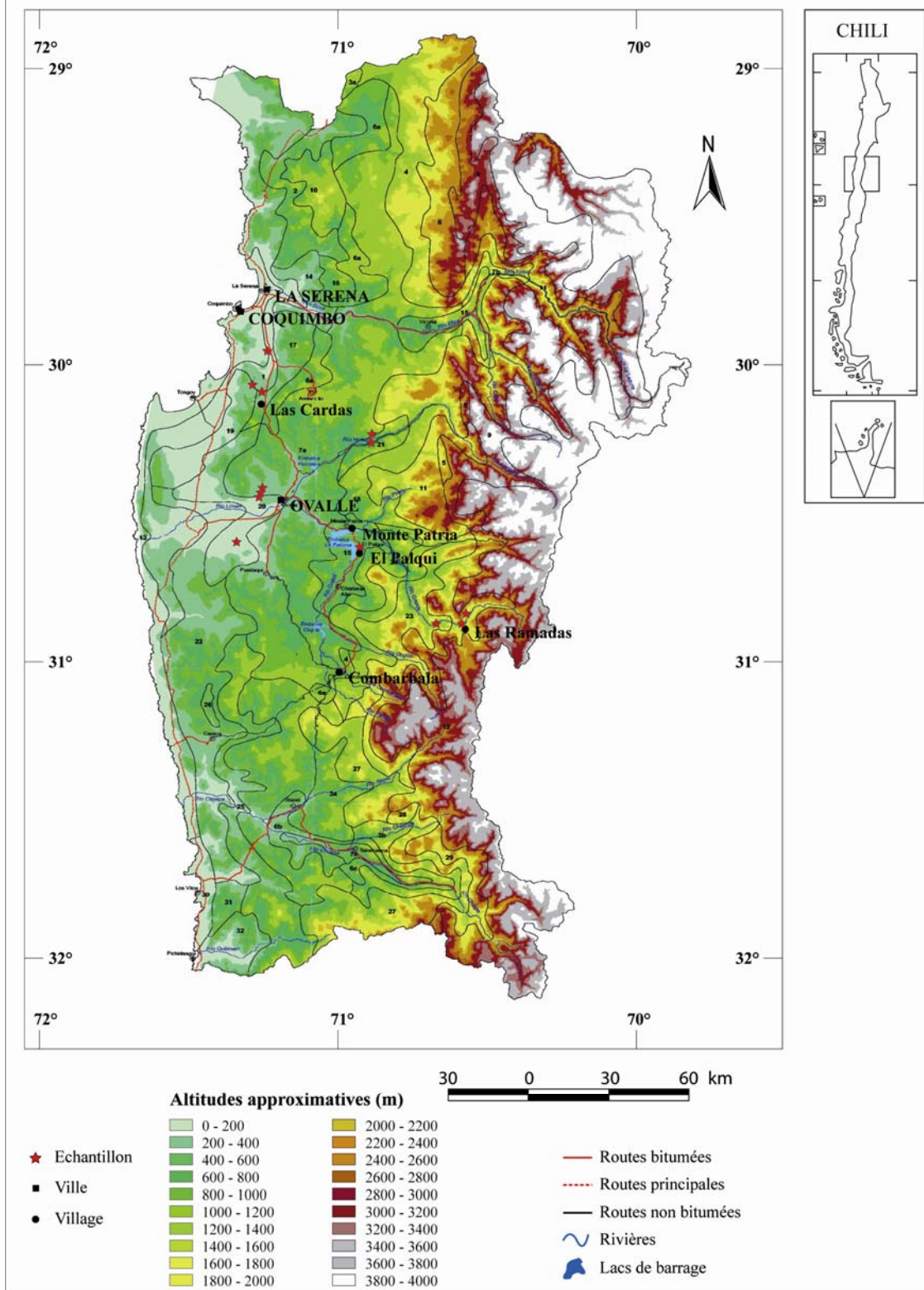
I. Contexte géographique

Le Chili est situé à l'extrême sud-ouest de l'Amérique du Sud et s'étend entre 17°35' S ; 69°28'W et 55°58' S ; 67°16' W. Il est bordé à l'ouest par l'Océan Pacifique et à l'est par la Cordillère des Andes. La région de Coquimbo (29°00' S ; 32°10'W) est une région aride située dans la zone nord du Chili, au sud du grand désert d'Atacama (Pouget *et al.*, 1996). Sa surface est de 40462 km² et correspond à 5,3% de la surface totale du pays (Sánchez et Morales, 1998). En termes de biodiversité, cette région appartient aux 25 régions les plus riches au monde. La végétation est composée de 1478 espèces natives et 244 espèces introduites. Les espèces dominantes sont les herbacées pérennes (44,7%), les arbustes (27,2%) et les herbacées annuelles et biennuelles (23%) (Squeo *et al.*, 2001). Du point de vue agricole cette région détient le pourcentage le plus élevé de surface irriguée par rapport à la surface totale potentiellement irrigable (INE 2007).

Sur l'ensemble du territoire chilien, les grandes structures géomorphologiques se succédant d'ouest en est sont : la frange littorale, la Cordillère de la Côte, une vallée longitudinale et la Cordillère des Andes (Paskoff, 1993). La région de Coquimbo constitue une rupture par rapport à la configuration générale du relief du Chili. En effet, d'ouest en est, quatre grands ensembles géomorphologiques sont identifiés (Figure 1.1) : la frange littorale, les grandes vallées fluviales, la moyenne-montagne et la Cordillère des Andes.

A

CARTE TOPOGRAPHIQUE de la REGION de COQUIMBO



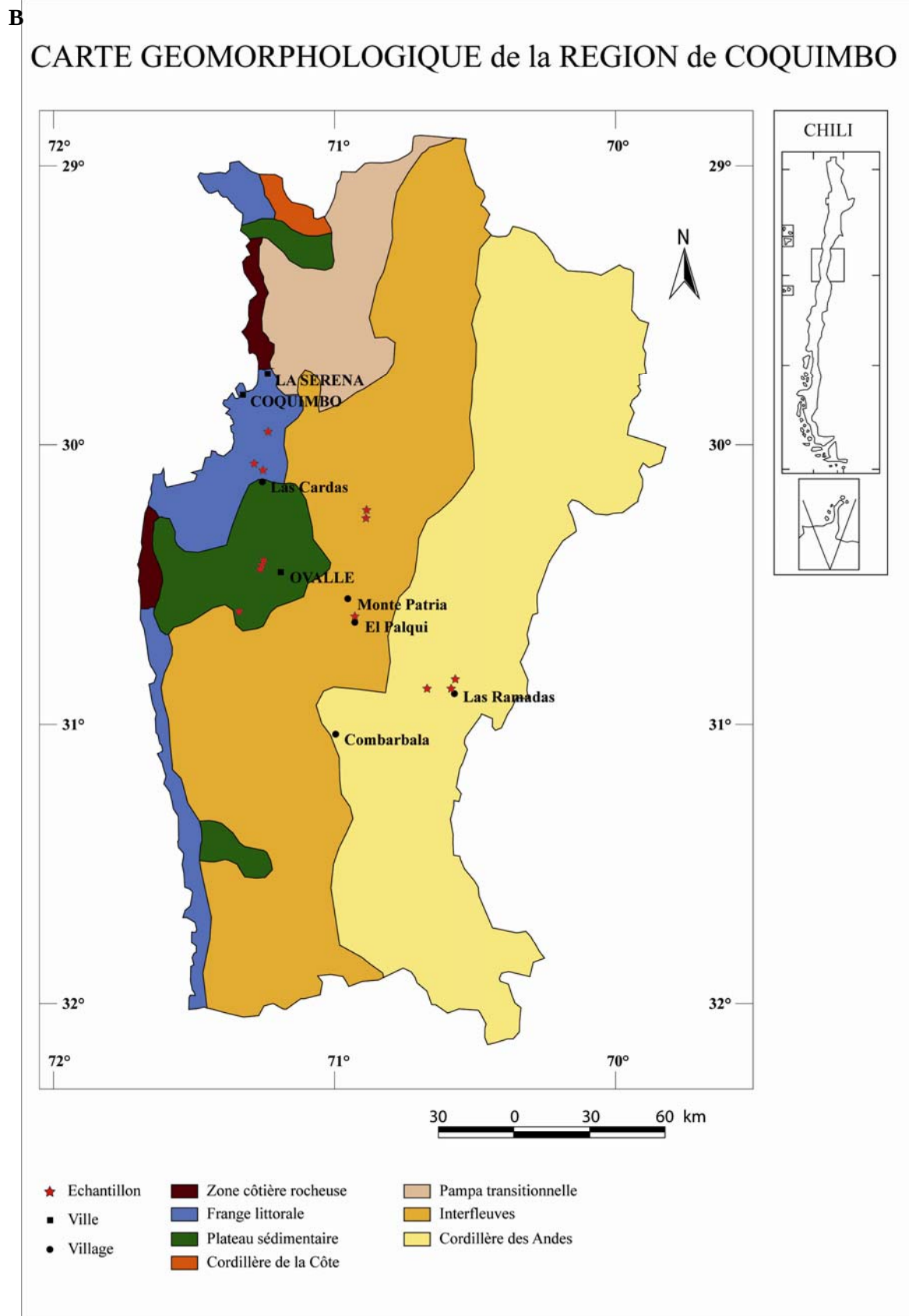


Figure 1.1. Région de Coquimbo a) carte topographique et b) carte géomorphologique.

I.1. La frange littorale

La frange littorale est exposée aux vents, à une certaine fraîcheur et à une barrière de brume générant selon le relief, une grande variété de paysages (Figure 1.2). Les côtes sont très accidentées dans la zone nord présentant des falaises, la zone centrale se caractérise par de grandes terrasses sédimentaires (baies de Coquimbo, de Tongoy), tandis que dans la zone sud apparaissent des dunes et des terrasses érodées, moins étendues (Novoa et López, 2001)

Les zones centrale et sud offrent des pâturages de printemps. De plus, la côte a été le lieu principal d'aménagements expérimentaux ayant pour objectif la reconstitution de couvertures végétales de façon à maintenir la capacité pastorale (plantations d'*Atriplex numularia* Lindl. et *Atriplex repanda* Phil.) (D'Andrea, 1997).

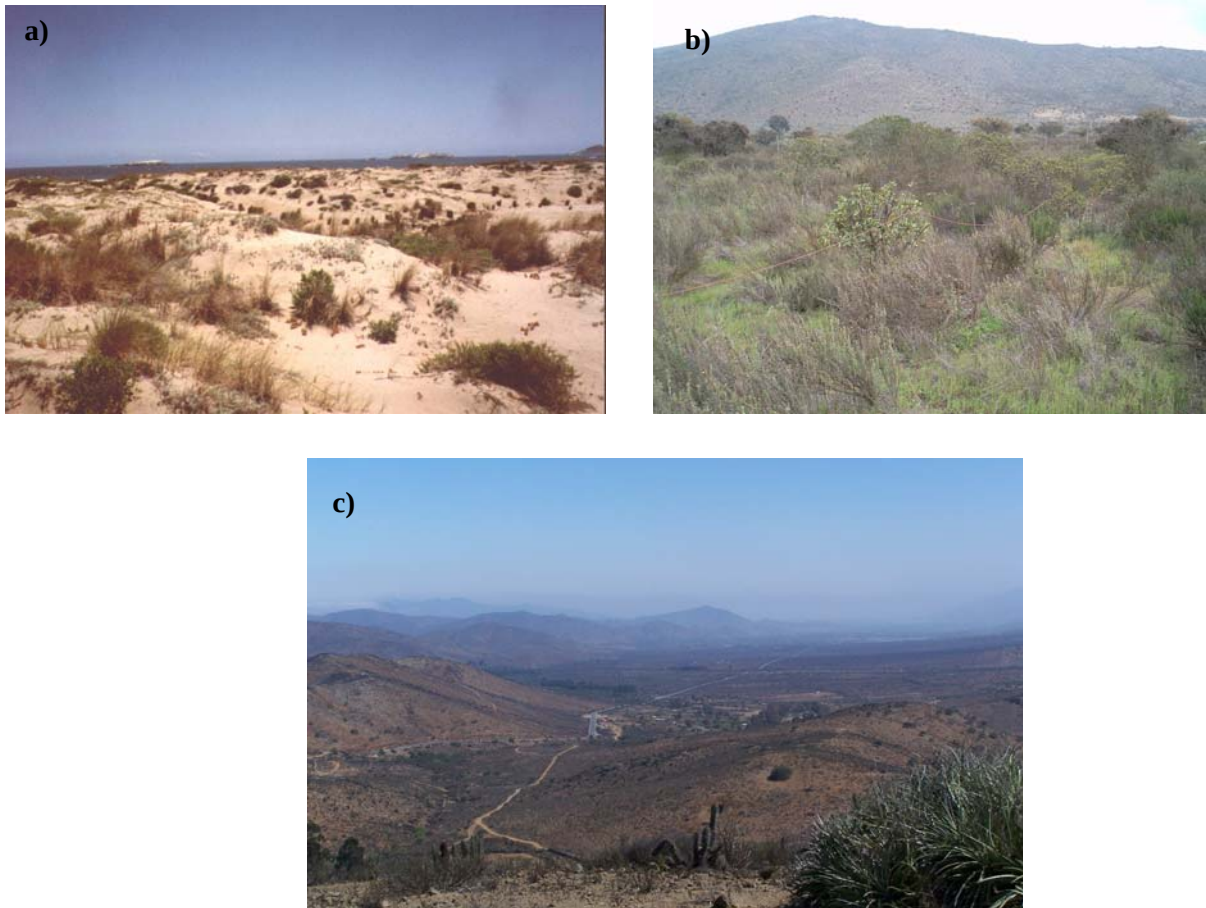


Figure 1.2. Photos illustrant des zones de la frange littorale a) Los Vilos, b) Las Cardas et c) Las Cardas.

I.2. Les vallées fluviales

Les trois grandes vallées fluviales ouvertes aux influences marines sont des steppes exposées à un climat tempéré (température moyenne annuelle supérieure à 10°C), plus humide dans la Vallée du Choapa (Figure 1.3). Ces vallées bénéficient d'un ensoleillement croissant vers l'est de la région. Elles présentent un système de terrasses alluviales qui a généré une mosaïque de sols dont la fertilité naturelle demeure médiocre (Paskoff, 1993). Néanmoins, cette zone constitue l'essentiel de l'espace irrigué et par conséquent la majeure partie de la surface cultivable régionale (D'Andrea, 1997). L'eau de l'irrigation provient de la haute montagne, avec la particularité dans le cas de la vallée du Limarí d'être régulée par un système de barrages (d'une capacité de 1 000 millions de m³) depuis 1953 (González *et al.*, 2001). L'acheminement de l'eau se fait grâce à un réseau de canaux complexe qui, associé à la topographie et au climat, fait des vallées le centre de la production agricole. Cependant l'agriculture est limitée par la forte variabilité des débits, liée à l'irrégularité interannuelle des précipitations (Álvarez, 2005).



Figure 1.3. Photos illustrant des zones de vallées fluviales a) Flor del Norte et b) Talhuén.

I.3. La moyenne montagne ou interfleuves

Cette dénomination désigne tout le massif, entre les Andes et la frange littorale, découpé par l'érosion fluviale et dont les reliefs ont une altitude ne dépassant pas 3000 m (Figure 1.4). Il s'en détache les trois grands systèmes hydrographiques de la région (du nord au sud, les fleuves Elqui, Limari et Choapa) qui forment quatre zones d'inter-fleuves. Le territoire situé au nord du fleuve Elqui est le plus aride, avec des précipitations annuelles se situant entre 20 et 120 mm. La limite de l'Elqui marque la fin des climats désertiques et le début de la steppe, mais l'on ne trouve pas dans l'interfleuve Elqui – Limarí d'eau superficielle permanente. Plus au sud, l'interfleuve Limarí – Choapa présente des précipitations supérieures à 200 mm au sud de Combarbalá. La végétation est de même nature qu'au nord mais se densifie. Ainsi l'espino (*Acacia caven* (Molina) Molina) devient dominant. Des cours d'eau permanents avec de faibles débits peuvent permettre l'irrigation. Au sud du Choapa enfin, les disponibilités en eau sont meilleures, de nouvelles essences apparaissent, et l'irrigation à partir des rivières est plus fréquente (Paskoff, 1993).

Globalement, les sols de la moyenne montagne sont très faiblement voir pas exploitables. Isolement, manque d'eau et topographie accidentée sont les principales causes. Le régime thermique assurant une absence de gelées 9 mois de l'année, autorise néanmoins très localement l'activité agricole. Malgré un déficit hydrique particulièrement sévère, une agriculture pluviale dite de « *secano* » est pratiquée. La principale utilisation de ces terres est finalement l'élevage, majoritairement caprin.

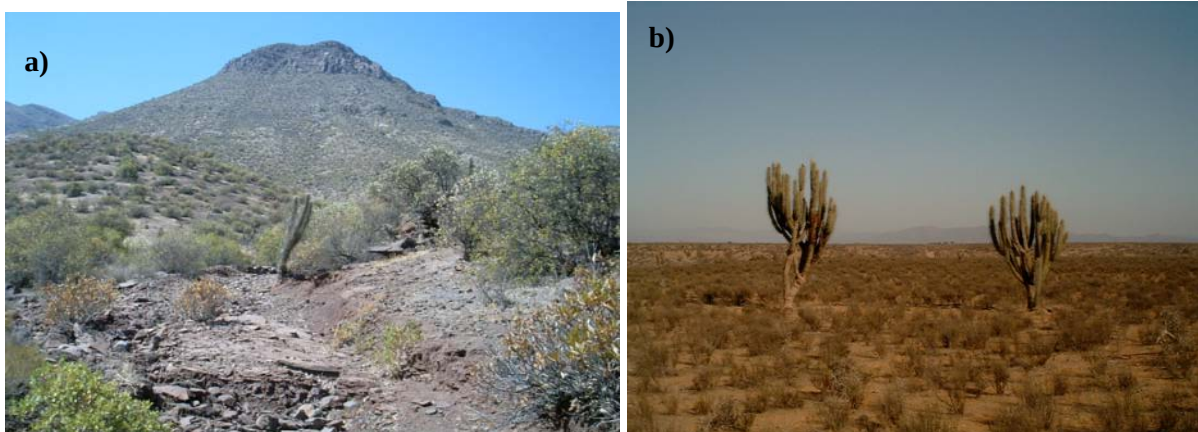


Figure 1.4. Photos illustrant a) une zone de moyenne montagne (San Pedro de Pichasca) et b) une zone d'interfleuve (Barraza).

I.4. La haute cordillère

Elle compose la partie est de la région et correspondant à la partie andine. Elle se subdivise en trois sous-unités du nord au sud: la Cordillère d'Elqui, la Cordillère du Limarí, et la Cordillère du Choapa (Figure 1.5). Du nord au sud, les altitudes des montagnes diminuent. La Cordillère de l'Elqui compte de nombreux sommets de plus de 4000 m sur la frontière argentine, tandis qu'ils se font plus rares dans le Limarí, et exceptionnels dans le Choapa. Parallèlement, les pentes se font moins abruptes, et les vallées plus nombreuses (Paskoff, 1993). L'altitude de la Cordillère d'Elqui en fait la principale zone où s'exerce un climat de toundra et s'accumule la neige. La steppe andine, composée de prairies xérophytes, apparaît en-dessous de 4000 m. Dans la Cordillère du Limarí la neige fond plus vite, les précipitations augmentent, et une steppe arbustive andine croît jusqu'à 3500 m. Celle-ci est plus fréquente sur les versants de la Cordillère du Choapa, qui connaît à ses altitudes maximales un climat de steppe froide de montagne. Il faut tenir compte en termes de ressources agro-pastorales du jeu des microclimats, qui dans une zone globalement difficile, peuvent générer des aires plus propices à l'installation humaine.

Quelques vallées (entre 1000 et 2000 m) disposant de sols peu productifs mais d'un bon ensoleillement sont néanmoins cultivées. La principale richesse de ces montagnes réside dans la couverture herbacée apparaissant sur certains versants et qui constitue un pâturage de qualité variable comme les « *veranadas* », qui sont des estives dont la superficie régionale est estimée entre 100 000 et 150 000 ha dans les Provinces du Limarí et du Choapa. Les transhumants utilisaient aussi les pâturages argentins.

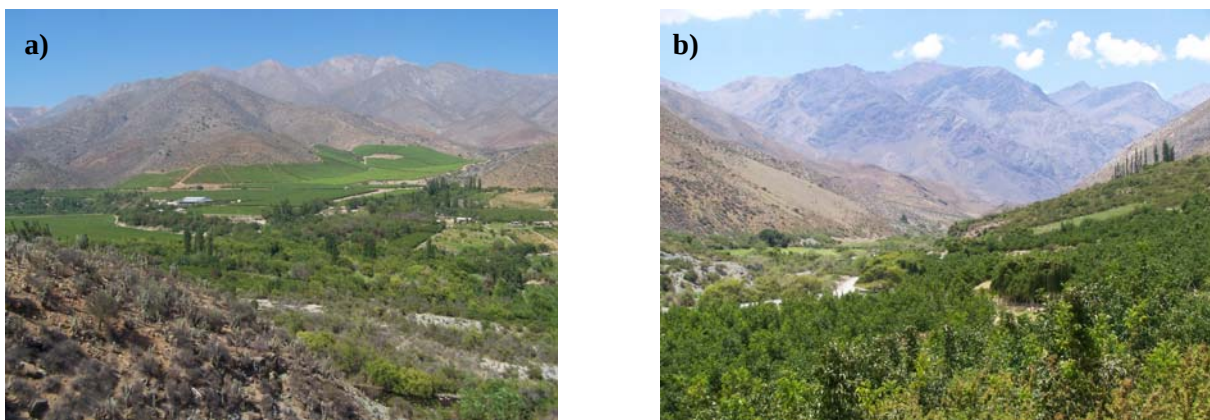


Figure 1.5. Photos illustrant des zones de la haute cordillère a) Tulahuén oriente et b) Las Ramadas.

II. Le cadre géologique

Les parties nord et centrale du pays peuvent être divisées en trois zones du nord au sud :

La zone côtière correspondant à la Cordillère de la Côte. Elle est principalement composée de roches ignées Paléozoïques et Mésozoïques. Dans la partie sud du Chili cette zone est constituée de turbidites mésozoïques.

La deuxième zone, dite de la dépression centrale, correspond à la vallée longitudinale décrite dans le paragraphe précédent. Celle-ci est occupée par des sédiments datés du Mésozoïque au Quaternaire, au sud de Santiago elle constitue la principale zone agricole. Dans le sud du pays, cette dépression disparaît. Elle est remplacée par une zone de transition entre les turbidites côtières et les Andes formées de roches ignées calco-alcalines d'âge Mésocénozoïque. Ces roches ignées appartiennent au batholite de granite patagonien, qui est l'un des plus longs au monde (Pankhurst et Hervé, 2007).

La troisième zone correspond à la Cordillère des Andes qui résulte d'une subduction vers l'est de la plaque de Nazca (plaque Antarctique au sud du Chili) sous la plaque Sud-Américaine. L'uplift de la chaîne a débuté au Miocène et continue aujourd'hui, pour preuve l'activité sismique. Cet uplift s'accompagne d'un raccourcissement crustal principalement accommodé par des chevauchements vers l'est.

D'après la carte géologique (Figure 1.6), on retrouve les trois zones géologiques dans la région de Coquimbo avec des roches ignées pour la Cordillères des Andes et la Côte, ainsi qu'un remplissage sédimentaire pour la dépression centrale. Il est à noter que l'ensemble des sites d'échantillonnage, présentés et décrits dans le Chapitre II, se situent au niveau des dépôts sédimentaires (Pankhurst et Hervé, 2007).

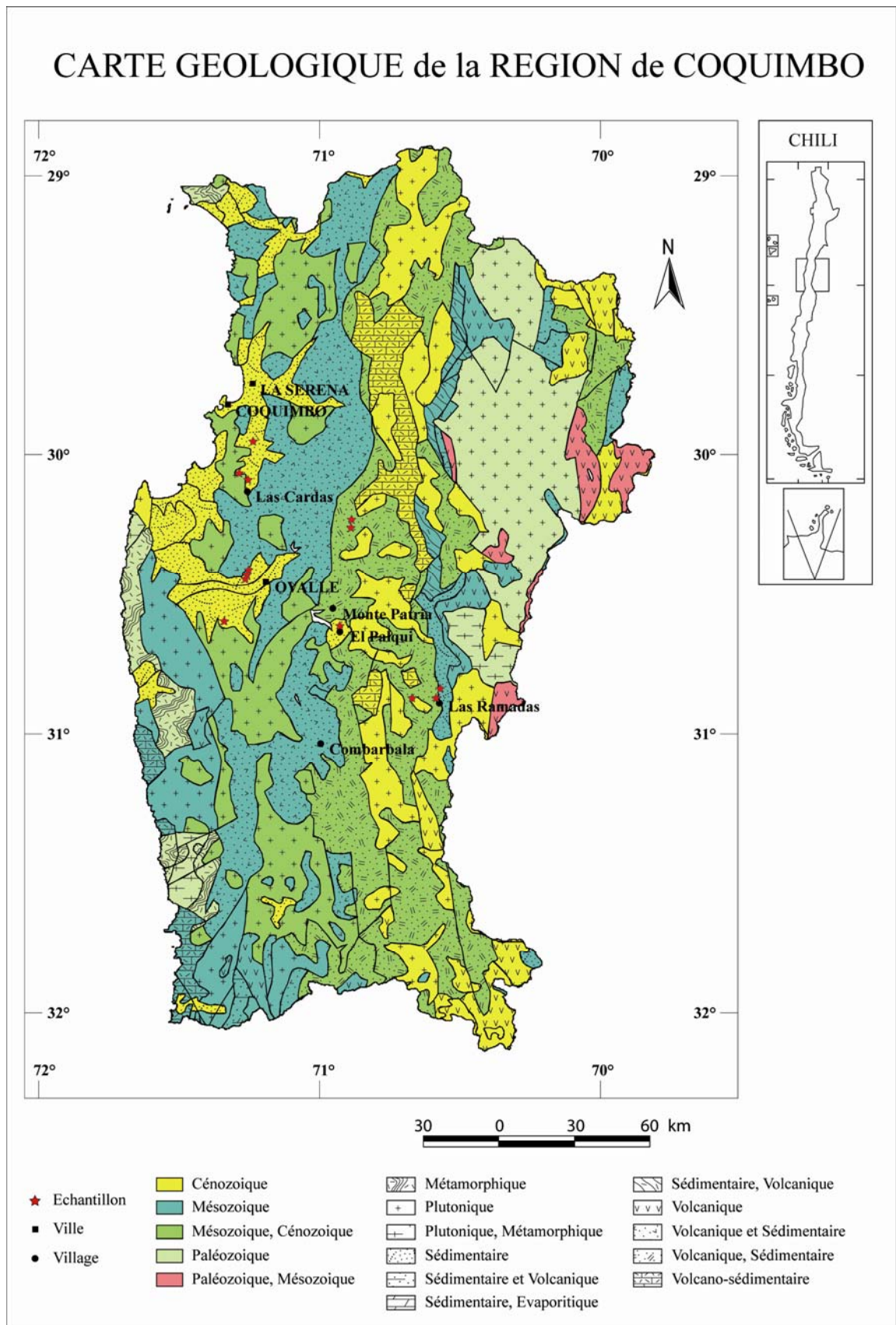


Figure 1.6. Carte géologique de la région de Coquimbo.

III. Les sols

Du nord au sud, le Chili présente quatre grandes zones : les sols des régions désertiques (18°-29° S), les sols des régions arides et semi-arides (29°-33° S), les sols de la région centrale (33°-38° S), les sols de la région centre-sud (38°-43° S) et les sols de la région sud (Luzio, 1994). La distribution des sols dans ces régions s'organise ensuite selon un axe ouest-est. La classification taxonomique des sols du Chili a été faite selon les critères du Département d'Agriculture des Etats-Unis (Soil Survey Staff, 1999). Dans le but de mieux repérer le lecteur, nous avons inclue la référence taxonomique selon les critères du World Reference Base (IUSS Working Group WRB, 2006) dans les cas où l'équivalence entre les deux classifications était possible. La carte des sols régionale est présentée à la fin du point III.6.

III.1. Les régions désertiques

Dans les régions désertiques, on distingue trois grandes zones avec leurs sols respectifs : les sols de la Cordillère de la Côte, de vallées fluviales et les sols d'altitude. Dans le tableau suivant vous pourrez trouver l'équivalence entre les termes des classifications selon les critères du Département d'Agriculture des Etats-Unis (Soil Taxonomy ; Soil Survey Staff, 1999) et World Reference Base (IUSS Working Group WRB, 2006) ainsi que les références bibliographiques associées.

Tableau 1.1. Classification des sols des régions désertiques.

Zones	Soil Survey Staff	Références	WRB	Références
Cordillère de la Côte	Entisols	- Luzio, 1986	Arenosols	- Deckers <i>et al.</i> , 2002 - IUSS Working Group WRB, 2006
	Torriorthents	- Alcayaga et Luzio, 1986 - Luzio et Alcayaga, 1992 - Luzio, 1994 - Soil Survey Staff, 1999 - Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005		
Vallées fluviales	Aridisols,	- Luzio, 1986	Arenosols	- Deckers <i>et al.</i> , 2002 - IUSS Working Group WRB, 2006
	Aquicambids Haplocambids	- Luzio et Alcayaga, 1992 - Luzio, 1994 - Soil Survey Staff, 1999 - Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005		
Altitude	Entisols,	- Luzio, 1986	Regosols	- Deckers <i>et al.</i> , 2002 - IUSS Working Group WRB, 2006
	Cryaquents, Cryorthents	- Alcayaga et Luzio, 1986 - Luzio et Alcayaga, 1992 - Luzio, 1994 - Soil Survey Staff, 1999 - Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005		
	Inceptisols Cryaquepts		Gleysols	- Deckers <i>et al.</i> , 2002 - IUSS Working Group WRB, 2006

Les sols de la Cordillère de la Côte sont très variables du point de vue de leur composition granulométrique, couleur et profondeur, avec une forte influence colluvial du fait de leur pente (Luzio, 1986; Alcayaga et Luzio, 1986 ; Luzio et Alcayaga, 1992 ; Luzio, 1994; Soil Survey Staff, 1999; Selvaradjou *et al.*, 2005).

Les sols des vallées fluviales sont peu développés et présentent des taux de salinité très élevés en raison de l'existence de sels solubles dans les sédiments du Pléistocène (Aquicambids). Au niveau des salars (dépôts salins) on trouve une croûte superficielle extrêmement dure, non soluble, sans réaction à l'HCl, et qui peut atteindre jusqu'à 60 cm d'épaisseur. Le pH varie entre 8,6 et 9,8. Dans les vallées qui traversent d'ouest en est cette région, même si elles occupent une surface très limitée, se développe une agriculture très intensive basée sur la culture d'oliviers, de vignes ainsi que de certains fruits tropicaux tels la mangue et les fruits de la passion (Luzio, 1986; Luzio et Alcayaga, 1992 ; Luzio, 1994; Soil Survey Staff, 1999; Selvaradjou *et al.*, 2005).

Les sols d'altitude correspondent aux sols au dessus de 1500 m, en incluant les piedmonts de la Cordillère et l'Altiplano. Sur ce dernier, la caractéristique dominante est le régime thermique des sols avec un très faible développement organique (Cryorthents). Pour les sols dérivés de matériaux volcaniques, ils sont peu évolués et classifiés comme Cryorthents. Dans les secteurs les plus élevés on trouve des tourbières sur des sols avec d'importantes concentrations salines ($150 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) (Cryaquents, Cryaquepts) (Luzio, 1986;

Alcayaga et Luzio, 1986 ; Luzio et Alcayaga, 1992 ; Luzio, 1994; Soil Survey Staff, 1999; Selvaradjou *et al.*, 2005).

III.2. Les régions arides et semi-arides

Dans les régions arides à semi-arides, on distingue trois grandes zones avec leurs sols respectifs: les sols des régions côtières, les sols des vallées et le sol des zones intérieures. La classification taxonomiques de ces sols selon les critères du Soil Survey Staff et le Word Reference Base et leurs références bibliographiques sont présentées dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2. Classification des sols des régions arides et semi-arides.

Zones	Soil Survey Staff	Références	WRB	Références
Régions côtières	Entisols			
	Torriorthents			
	Torripsamments	- Luzio, 1986		
	Aridisols	- Luzio et Alcayaga, 1992	Arenosols	- Roca-Pascual et Pazos, 2001
	Pelargids	- Soil Survey Staff, 1999	Regosols	- Deckers <i>et al.</i> , 2002
	Natrargids	- Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005	Solonetz	- IUSS Working Group WRB, 2006
	Petrocambids	- Aburto <i>et al.</i> , 2008	Durisols	
	Haplocambids			
	Haplodurids			
Vallées	Entisols	- Luzio, 1986		
	Torriorthents	- Alcayaga et Luzio, 1986		
		- Luzio et Alcayaga, 1992	Arenosols	- Deckers <i>et al.</i> , 2002
	Aridisols,	- Luzio, 1994	Calcisols	- IUSS Working Group WRB, 2006
	Haplocalcids	- Soil Survey Staff, 1999		
	Haplocambids	- Oyarzún et Álvarez, 2001		
Zones intérieures	Entisols,	- Luzio, 1986		
	Cryochrepts	- Luzio et Alcayaga, 1992	Regosols	- Deckers <i>et al.</i> , 2002
	Cryorthents	- Luzio, 1994	Arenosols	- IUSS Working Group WRB, 2006
		- Soil Survey Staff, 1999		
	Aridisols			
	Haplocambids			

Les sols des régions côtières sont de nature très variée. Ils se sont développés soit sur des terrasses alluviales soit sur un batholite. Les sols des terrasses basses se développent sur des dunes stabilisées. Ils sont profonds, avec une granulométrie sableuses et une capacité de rétention d'eau assez limitée (Torripsamments). Les sols des terrasses hautes sont plus développés et présentent des horizons argiliques (Paleargids) et des horizons natriques (Natrargids). Les sols dérivés du batholite sont moins développés.

Les sols développés récemment se trouvent sur des falaises à forte pente entre les affleurements (Torriorthents). Les sols de fond de vallées et qui développent un horizon cambique sont plus profonds (jusqu'à 1 m) (Petrocambids) (Luzio, 1986; Alcayaga et Luzio, 1986 ; Luzio et Alcayaga, 1992 ; Luzio, 1994; Soil Survey Staff, 1999; Aburto *et al.*, 2008).

Les sols sur la zone des vallées en particulier sont peu abondants. Se sont des sols assez évolués pour avoir un horizon cambique sur des sédiments alluviaux récents, avec des granulométries plutôt fines (Torriorthents, Haplocambids, Haplocalcids) (Luzio, 1986; Alcayaga et Luzio, 1986 ; Luzio et Alcayaga, 1992 ; Luzio, 1994; Oyarzún et Álvarez, 2001 ; Soil Survey Staff, 1999).

Les sols des zones intérieures (Entisols, Cryorthents, Cryochrepts) : ils sont situés sur des zones très accidentées, avec des pentes qui varient de 20 à 60% et avec une profondeur moyenne de 70 cm sur une roche fortement météorisée. Ils développent un horizon cambique mis en évidence par une augmentation des argiles en profondeur (Haplocambids) (Luzio, 1986; Luzio et Alcayaga, 1992 ; Luzio, 1994 ; Soil Survey Staff, 1999).

III.3. La région centrale

Les sols de la région centrale sont compris entre la vallée de l'Aconcagua au nord jusqu'à la ville de Collipulli au sud. Ils sont dominés par un régime d'humidité xérique, et se répartissent selon trois zones (tableau 1.3):

Tableau 1.3. Classification des sols de la région centrale.

Zones	Soil Survey Staff	Références	WRB	Références
Secteur côtier	Inceptisols Ustepts	- Luzio, 1986 - Alcayaga et Luzio, 1986 - Luzio et Alcayaga, 1992 - Luzio, 1994	Gleysols	- Casanova, Luzio, and Maldonado, 2007 - Deckers <i>et al.</i> , 2002
	Alfisols Haplustalfs	- Soil Survey Staff, 1999 - Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005	Lixisols	- IUSS Working Group WRB, 2006
Vallées	Alfisols Palexeralfs	- Luzio, 1986 - Luzio et Alcayaga, 1992 - Luzio, 1994	Lixisols	- Casanova, Luzio, and Maldonado, 2007 - IUSS Working Group WRB, 2006
	Mollisols Xerolls	- Soil Survey Staff, 1999 - Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005	Phaeozem	
	Inceptisols Ustepts		Gleysols	
Piedmont des Andes	Entisols, Cryorthents	- Luzio, 1986 - Alcayaga et Luzio, 1986 - Luzio et Alcayaga, 1992 - Luzio, 1994	Regosols	- Casanova, Luzio, and Maldonado, 2007 - IUSS Working Group WRB, 2006
	Inceptisols Cryepts	- Soil Survey Staff, 1999 - Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005	Gleysols	- Deckers <i>et al.</i> , 2002 - IUSS Working Group WRB, 2006
	Andisols			

Les sols du secteur côtier qui sont situés sur des plateformes sédimentaires et sur la Cordillères de la Côte. Ce sont des sols profonds d'une granulométrie très variable avec soit des horizons B d'illuviation (Inceptisols de type Ustepts), soit la présence d'un horizon induré dans les 100 premiers cm (Alfisols de type Haplustalfs) (Luzio, 1986 ; Alcayaga et Luzio, 1986 ; Luzio et Alcayaga, 1992 ; Luzio, 1994 ; Soil Survey Staff, 1999 ; Selvaradjou *et al.*, 2005).

Les sols des vallées sont situés sur des terrasses récentes et anciennes, (dépression intermédiaire). Ils sont d'origine alluvio-colluviale, de granulométrie moyenne (limoneux, sablo-argilo-limoneux), de profondeur moyenne (100 à 150 cm) présentant des teneurs en carbone organique faibles ($<40\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) (Alfisols, Palexeralfs ; Mollisols, Xerolls). On rencontre localement des sols possédant un horizon argileux d'illuviation, les Inceptisols Ustepts (Luzio, 1986 ; Alcayaga et Luzio, 1986 ; Luzio et Alcayaga, 1992 ; Luzio, 1994; Soil Survey Staff, 1999 ; Selvaradjou *et al.*, 2005).

Les sols du Piedmont des Andes qui sont situés entre 800 et 3500 m d'altitude. Ce sont des sols soumis à une érosion intense du fait principalement de la pente avec la présence de nombreux affleurements de la roche sous-jacente (Entisols de type Cryorthents ; Inceptisols de type Cryepts). Entre 800 et 3500 m d'altitude, la situation change et les sols développés sur des matériaux d'origine volcanique sont plus développés, plus profonds avec la présence d'un

horizon cambique (Andisols) (Luzio, 1986 ; Alcayaga et Luzio, 1986 ; Luzio et Alcayaga, 1992 ; Luzio, 1994 ; Soil Survey Staff, 1999 ; Selvaradjou et al., 2005).

III.4. Les sols de la région centre-sud

Ils se divisent en trois catégories : les sols de la Cordillère de la Côte, de la Dépression Intermédiaire et les sols de la Cordillère et Précordillère (tableau 1.4).

Tableau 1.4. Classification des sols de la région centre – sud.

Zones	Soil Survey Staff	Références	WRB	Références
Cordillère de la Côte	Alfisols	- Luzio, 1986	Luvisols	- Salazar, Casanova, Luzio, 2005
	Paleudalfs	- Luzio et Alcayaga, 1992		- Deckers <i>et al.</i> , 2002
	Hapludalfs	- Luzio, 1994		- IUSS Working Group WRB, 2006
		- Soil Survey Staff, 1999		
		- Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005		
Dépression Intermédiaire	Andisols	- Luzio, 1986	Andosols	- Salazar, Casanova, Luzio, 2005
	Hapludands	- Luzio et Alcayaga, 1992		- IUSS Working Group WRB, 2006
	Placaquands	- Luzio, 1994		
	Ultisols	- Soil Survey Staff, 1999		
	Haplohumults	- Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005	Acrisols	
Cordillère et Précordillère	Entisols	- Luzio, 1986	Regosols	- Deckers <i>et al.</i> , 2002
		- Alcayaga et Luzio, 1986		- IUSS Working Group WRB, 2006
		- Luzio et Alcayaga, 1992		
		- Luzio, 1994		
		- Soil Survey Staff, 1999		
		- Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005		

Les sols de la Cordillère de la Côte se sont développés sur deux unités physiographiques : les terrasses et la Cordillère de Nahuelbuta. Dans la première situation, les sols sont profonds, de texture moyenne (limoneux à sablo-argilo-limoneux) et bien drainés. Quand le relief est peu accidenté les sols sont des Alfisols, Paleudalfs. Dans la deuxième situation, le relief est abrupt, avec des horizons argiliques bien développés, d'origine métamorphique (Alfisols, Hapludalfs).

Les sols de la dépression intermédiaire sont d'origine volcanique (cendres volcaniques), profonds, de texture moyenne (limoneux à sablo-argilo-limoneux), avec des teneurs importantes en matière organique, une excellente fertilité et une bonne capacité de

rétenction en eau. D'après Luzio (1986), Luzio et Alcayaga (1992), Luzio (1994), Soil Survey Staff (1999), Selvaradjou *et al.*, (2005), ce sont des Andisols Hapludands équivalent Andosols (Salazar, Casanova, et Luzio, 2005 ; IUSS Working Group WRB, 2006) et des Ultisols Haplohumults, équivalent Acrisols (Salazar, Casanova, et Luzio, 2005 ; IUSS Working Group WRB, 2006). Dans les fonds de vallées, on trouve des sols mal drainés, moins épais, avec d'importantes teneurs en matière organique et la présence d'un horizon induré ferreux imperméable (*fierillo*). On les appelle « *ñadis* » et ils sont classifiés d'après Luzio (1986), Luzio et Alcayaga (1992), Luzio (1994), Soil Survey Staff (1999), Selvaradjou *et al.*, (2005) comme des Andisols, Placaquands (Andosols).

Les sols de la Cordillère et de la Précordillère : ils se développent sur un relief très abrupt à partir de matériaux volcaniques avec une granulométrie très variée. Les sols développés à partir de tephres sont plutôt fins avec un horizon superficiel riche en matière organique. Ils sont classifiés comme des Entisols (Regosols). Des phénomènes de podzolisation sont présents (Luzio, 1986 ; Luzio et Alcayaga, 1992 ; Luzio, 1994 ; Soil Survey Staff, 1999 ; Selvaradjou *et al.*, 2005).

III.5. Les sols de la région sud

Ils sont peu étudiés et cela principalement en raison des difficultés d'accès et des conditions climatiques assez extrêmes. Dans les secteurs escarpés de Chiloé continental et de la province d'Aysén, on rencontre des sols d'origine volcanique bien évolués (*trumaos*), avec cependant encore une prédominance du matériau parental (verres volcaniques). Ces sols sont pour la plupart classés comme étant des Andisols Hapludands et Udivitrands (Andosols) (tableau 1.5). Le développement de Spodosols a été aussi répertorié dans la région de Magallanes. Enfin, les sols de l'Antarctique présentent un développement de profil très limité avec la présence d'un permafrost à moins de 1 m et de très faibles teneurs en matière organique (Álvarez, 1993 ; Luzio, 1994). D'après Luzio (1986), Luzio et Alcayaga (1992), Luzio (1994) et Soil Survey Staff (1999) ce sont des Inceptisols (Gleysols).

Tableau 1.5. Classification des sols de la région sud.

Zones	Soil Survey Staff	Références	WRB	Références
Province d'Aysén	Andisols Hapludands Udivitrands	- Luzio, 1986 - Luzio et Alcayaga, 1992 - Luzio, 1994 - Soil Survey Staff, 1999 - Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005	Andosols	- Deckers <i>et al.</i> , 2002 - IUSS Working Group WRB, 2006
	Spodosols	- Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005		
Antarctique	Inceptisols	- Luzio, 1986 - Luzio et Alcayaga, 1992 - Álvarez, 1993 - Luzio, 1994 - Soil Survey Staff, 1999 - Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005	Gleysols	- Deckers <i>et al.</i> , 2002 - IUSS Working Group WRB, 2006

III.6. Les sols de la région de Coquimbo

Les sols de la région de Coquimbo appartiennent aux sols dits des régions arides et semi-arides décrit dans les paragraphes précédents (Luzio, 1986 ; Luzio et Alcayaga, 1992 ; Luzio, 1994).

Les sols appartenant à la région côtière (frange littorale) se distribuent du nord au sud tout au long de la région (Figure 1.7) et sont soit des Entisols (Torriorthents - Arenosols), soit

des Aridisols (Peleargids, Natrargids – Solonetz et Petrocambids) (Luzio, 1986 ; Luzio et Alcayaga, 1992 ; Luzio, 1994 ; Soil Survey Staff, 1999 ; et Aburto *et al.*, 2008).

Du nord au sud, les sols dits des vallées, correspondent à des sols localisés dans les vallées fluviales et les interfleuves de la moyenne montagne. Ils sont d'origines alluvionnaires et colluvionnaires et se distribuent de manière irrégulière. Dans le nord de la région on trouve des Petrocambids, des Torriorthents et Torripsamments (Regosols), qui évoluent vers des Haplocambids, Haplodurids (Durisols), Peleargids et Natrargids (Solonetz) vers le sud de la région (tableau 1.6).

Les sols dits des zones intérieures (haute cordillère du point de vue géomorphologique) ont une distribution assez homogène tout au long de la cordillère. Concentré dans l'extrême nord de la région, on trouve des Cryorthents (Regosols) (tableau 1.6). Vers le sud, du fait du relief plus accidenté et d'un gradient croissant de température et de précipitations (Figures 1.8a et b, 1.9) on retrouve des Cryepts (Luzio, 1986 ; Alcayaga et Luzio, 1986 ; Luzio et Alcayaga, 1992 ; Luzio, 1994 ; Soil Survey Staff, 1999 ; Selvaradjou *et al.*, 2005).

Tableau 1.6. Classification des sols de la région de Coquimbo.

Zones	Soil Survey Staff	Références	WRB	Références
Frange littorale	Entisols Torriorthents	- Luzio, 1986 - Luzio et Alcayaga, 1992 - Luzio, 1994	Arenosols	- Deckers <i>et al.</i> , 2002 - IUSS Working Group WRB, 2006
	Aridisols Pelargids Natrargids Petrocambids	- Soil Survey Staff, 1999 - Aburto <i>et al.</i> , 2008	Solonetz	
Vallées	Entisols Torriorthents Torripsamments	- Luzio, 1986 - Luzio et Alcayaga, 1992 - Luzio, 1994	Regosols	- Salazar, Casanova, Luzio, 2005 - IUSS Working Group WRB, 2006
	Aridisols Haplocambids Haplodurids	- Soil Survey Staff, 1999 - Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005	Durisols	
Zones intérieures	Entisols Cryorthents	- Luzio, 1986 - Alcayaga et Luzio, 1986 - Luzio et Alcayaga, 1992 - Luzio, 1994	Regosols	- Deckers <i>et al.</i> , 2002 - IUSS Working Group WRB, 2006
	Inceptisols Cryepts	- Soil Survey Staff, 1999 - Selvaradjou <i>et al.</i> , 2005	Gleysols	

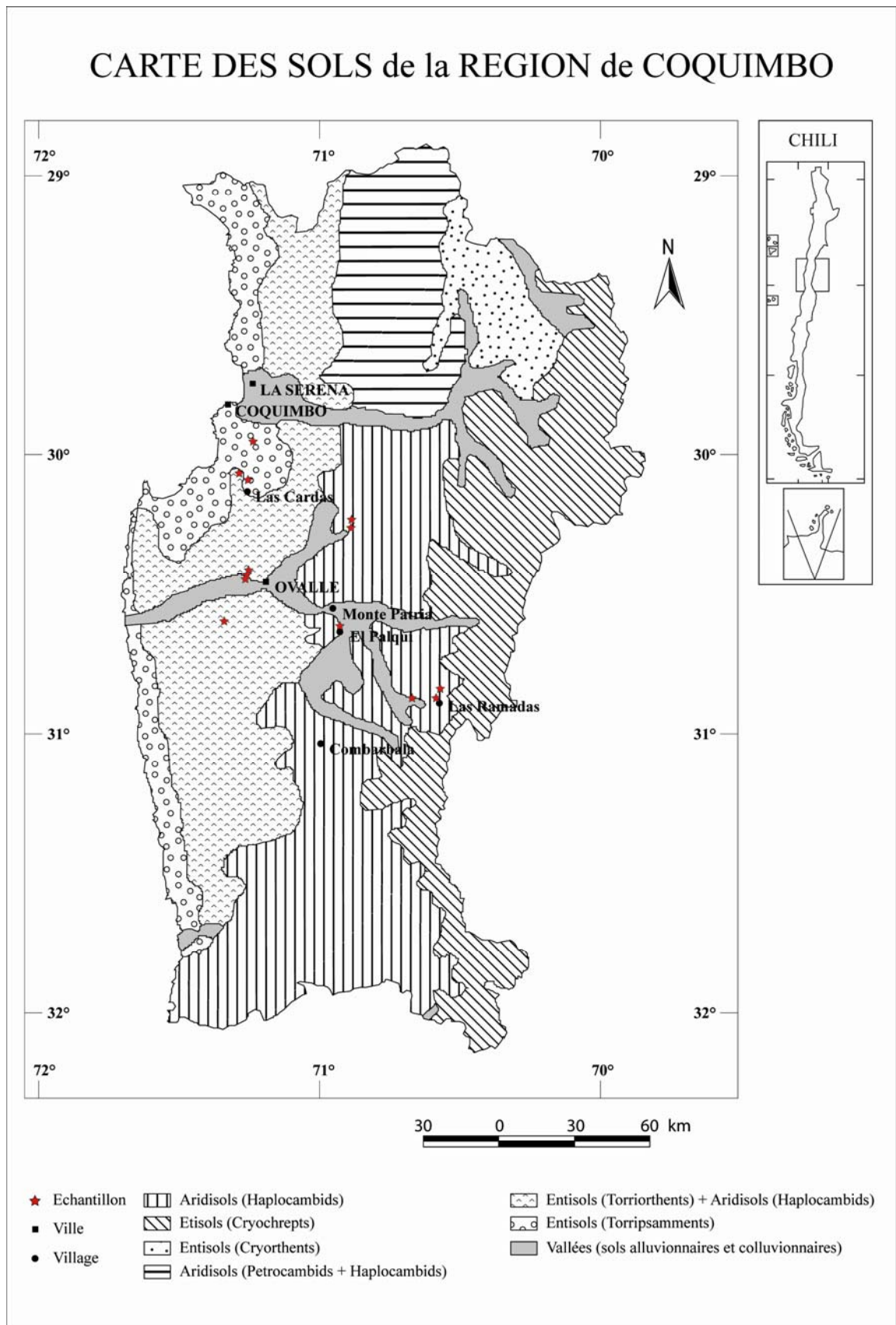


Figure 1.7. Carte des sols de la région de Coquimbo (extrait 1 : 1 000 000).

IV. Le climat

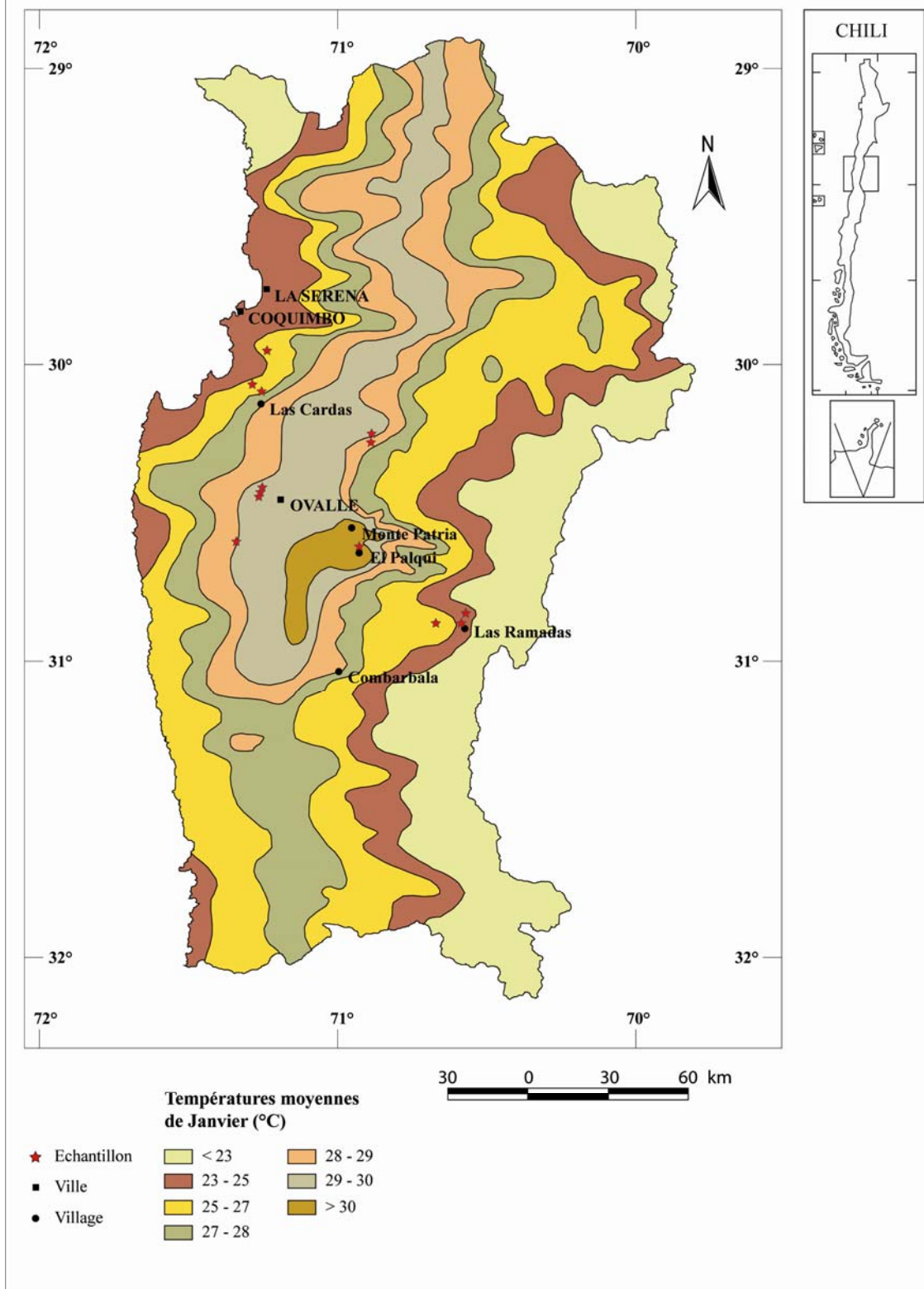
Le climat de la région de Coquimbo est le résultat de l'interaction de trois facteurs : les hautes pressions subtropicales, en particulier l'anticyclone du Pacifique sud-oriental, la présence du courant froid de Humboldt dans l'océan Pacifique et le relief longitudinal de la cordillère côtière, de la Cordillère des Andes et des zones interfleuves, qui rendent difficiles le déplacement des masses d'air et qui donnent son caractère aride au climat local (Romero, 1985; Novoa et Villaseca, 1989).

Les vallées transversales reliant la haute montagne à l'océan, le désert le plus aride du monde au nord ($2 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ de précipitations) et le début de la zone méditerranéenne à pluies hivernales régulières au sud, font de la région de Coquimbo une aire de transition au système climatique très complexe, défini comme semi-aride par les climatologues. La région bénéficie d'un ciel limpide (descente d'air sec et pur de la haute atmosphère) et enregistre un maximum de radiations solaires dans les zones non soumises aux brouillards côtiers (IGM, 1988). La cause fondamentale de ce climat est l'anticyclone du Pacifique qui bloque les dépressions frontales durant l'hiver austral. Le déplacement de l'anticyclone à l'ouest ou au nord, est à l'origine des précipitations.

Les radiations maximales produisent un phénomène d'inversion thermique sur un grand espace intérieur où la température ne baisse pas avec l'altitude. Ainsi, entre 400 et 1200 m la température de l'air est supérieure à ce qu'elle devrait être (de 3°C en hiver à 6°C en été), créant des conditions très favorables pour l'agriculture. Les températures sont assez homogènes tout au long de l'année sur la côte, tandis que l'amplitude thermique est importante à l'intérieur de la région. Les moyennes du mois le plus chaud atteignent $20,6^{\circ}\text{C}$ à Coquimbo, $28,5^{\circ}\text{C}$ à Ovalle et 31°C à Combarbalá, tandis que les moyennes du mois le plus froid sont respectivement de $9,2^{\circ}\text{C}$; $6,3^{\circ}\text{C}$ et $3,5^{\circ}\text{C}$ (IGM, 1988) (Figures 1.8a et 1.8b).

A

CARTE des TEMPERATURES de la REGION de COQUIMBO



B

CARTE des TEMPERATURES de la REGION de COQUIMBO

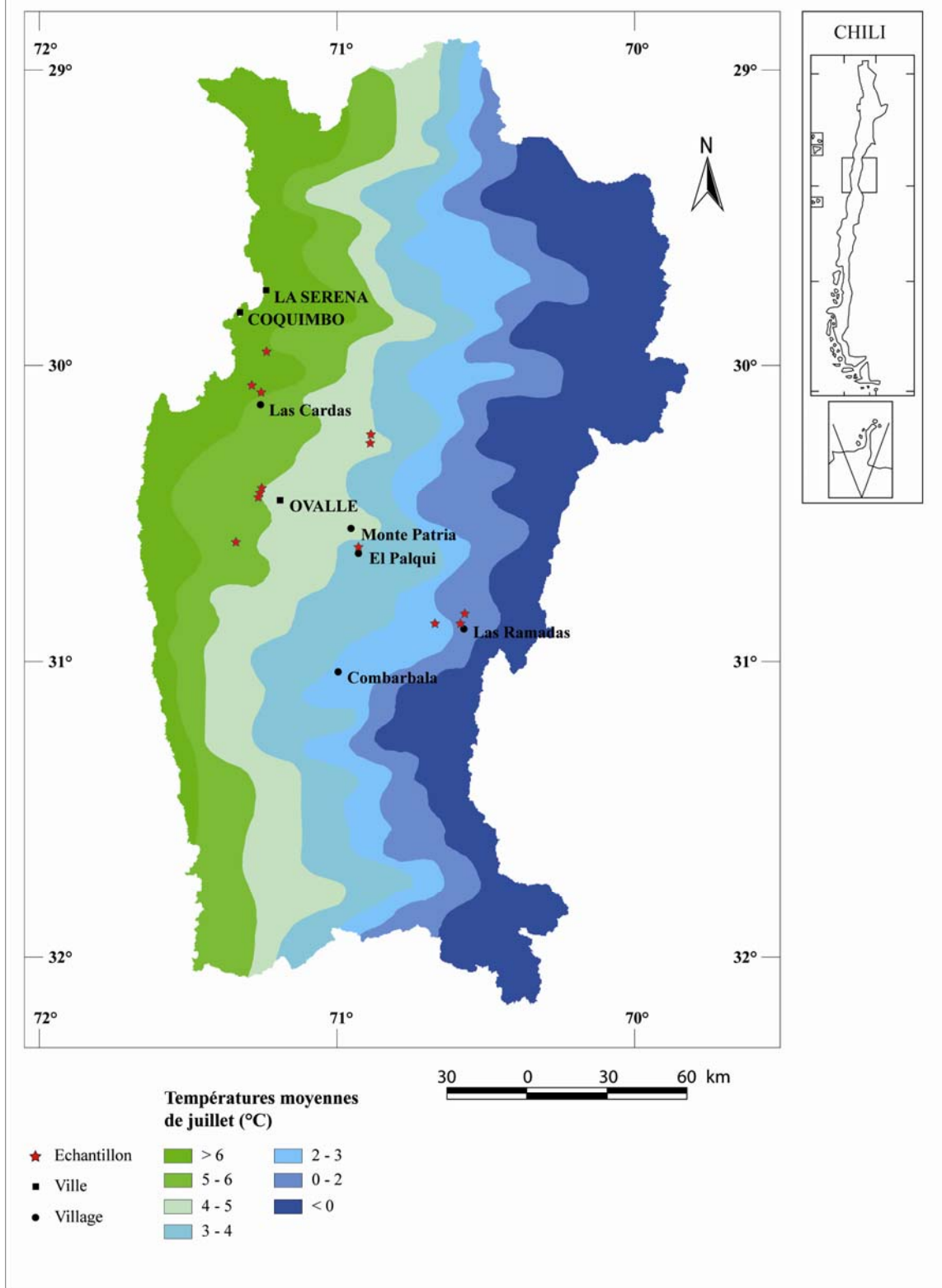


Figure 1.8. Carte des températures moyennes au mois de a) janvier et b) juillet de la région de Coquimbo.

Il existe un gradient d'humidité croissant orienté nord-sud. S'ajoute un gradient ouest-est dû à l'influence andine. La présence du courant froid de Humboldt produit un cycle journalier et saisonnier de brouillards côtiers pénétrant jusqu'aux reliefs des interfleuves et atténuant ainsi les conditions d'aridité sur la frange littorale. Les pluies sont rares et concentrées : 81% des précipitations ont lieu entre les mois de mai et août. Il y a en moyenne 18,7 jours de pluie par an à La Serena, 10,8 jours à Ovalle, et 17,3 jours à Illapel. Les pluies sont faibles sur la côte (à La Serena 47% des précipitations sont inférieures à 1 mm) et plus intenses à l'intérieur (54% des précipitations sont comprises entre 1 mm et 10 mm à Ovalle, 52% à Illapel). Le niveau moyen annuel de précipitations était de 195 mm sur la décennie 1971 – 1980 pour toute la région, de 72 mm à La Serena, et de 103 mm à Ovalle (González *et al.*, 2001). La Figure 1.9 montre la distribution des précipitations dans la région.

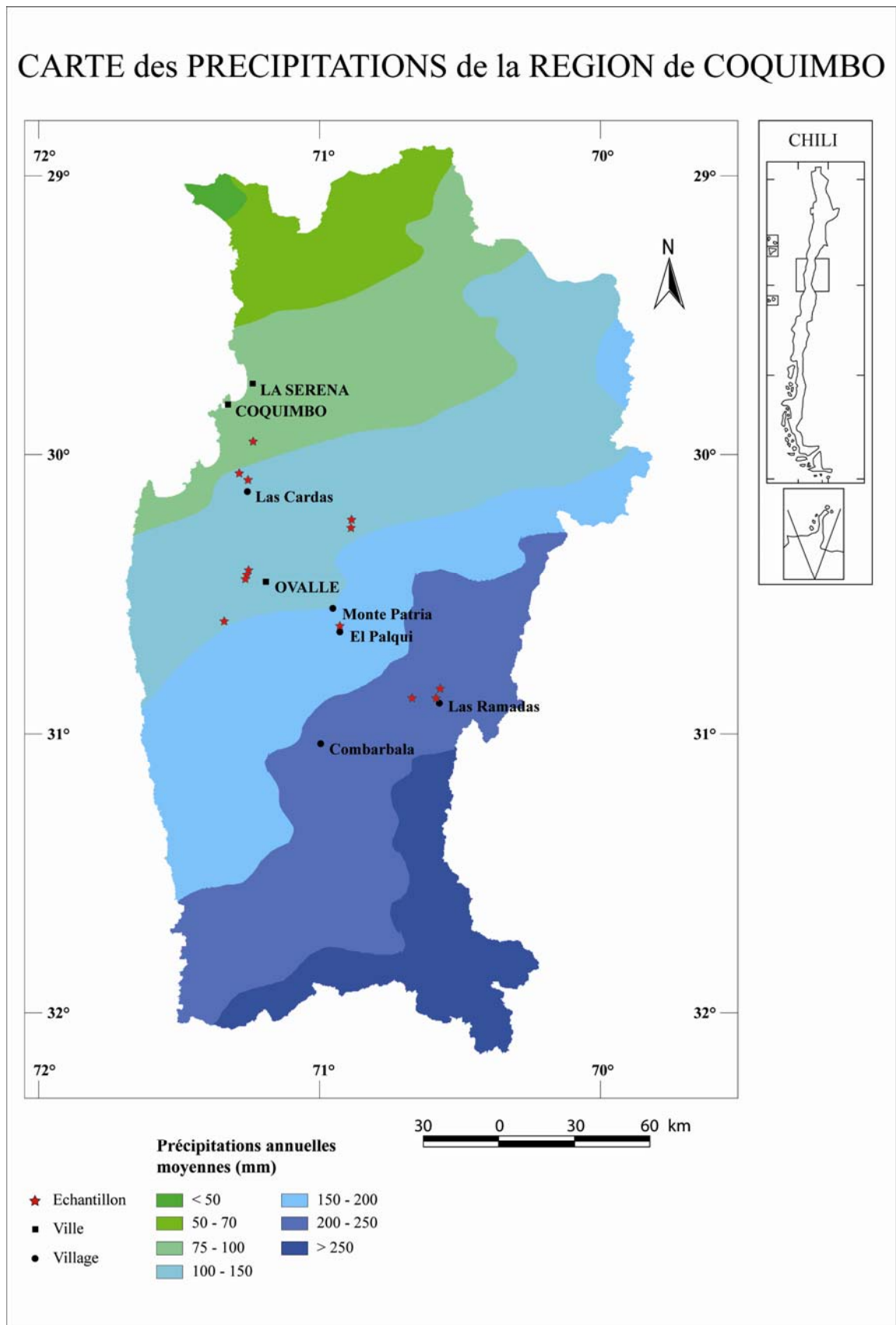


Figure 1.9. Carte des précipitations annuelles de la région de Coquimbo.

La région de Coquimbo est soumise à une grande variabilité interannuelle des précipitations, et par conséquent à celles de la durée des périodes de sécheresse. Les années de sécheresse (une année de sécheresse correspond à des précipitations de 30 à 60 mm, d'extrême sécheresse à moins de 30 mm) se succèdent parfois dans des conditions alarmantes, comme entre 1968 et 1970, et à une époque plus récente, entre 1993 et 1996. Cette dernière période a été qualifiée de sécheresse la plus grave du siècle. Mais la sécheresse ne se manifeste pas sur tout le territoire de la même façon. Elle affecte les vallées d'Elqui et du Limarí avec plus d'intensité (IGM, 1988).

Les cours d'eau sont alimentés essentiellement par les accumulations de neige et de glace dans les hautes vallées de la cordillère. De la topographie et de la température dépend le rythme de l'écoulement. Celui-ci est en décalage avec les saisons puisque les débits maximaux sont enregistrés en été. Mais sur plusieurs années et pour le même mois, les débits peuvent varier fortement. Ainsi, à l'incertitude des précipitations, s'ajoute celle des écoulements. De surcroît, les risques d'inondation des vallées sont importants, particulièrement à cause des pluies concentrées : pendant la période comprise entre les années 1900 et 1981, 522 inondations ont été enregistrées (IGM, 1988).

V. Objectif et organisation de l'étude

Dans un premier temps, nous présenterons les sites qui ont été sélectionnés pour l'étude (Chapitre II.). Ensuite, nous décrirons le mode d'échantillonnage et les méthodes utilisées (Chapitre III). Une description complète des protocoles suivis sur le terrain et en laboratoire sera réalisée. Une partie importante sera réservée à la description des méthodes d'analyse quantitative et qualitative de la matière organique (pyrolyse Rock-Eval), sur lesquelles reposent de nombreuses conclusions de ce travail de recherche.

Cette présentation nous conduira à rassembler l'ensemble des données dans les chapitres suivants. Le Chapitre IV correspondant à la présentation des résultats pédologiques obtenus pour chaque site d'étude et à la comparaison avec les données issues de la littérature. Il nous permettra de discuter et de comprendre le comportement des données dans un milieu aride de la partie nord du Chili.

La présentation et la discussion des résultats des analyses quantitatives et qualitatives de la matière organique des sites échantillonnés seront abordées dans le Chapitre V. Les conclusions de ce chapitre nous amèneront à établir les hypothèses autour du phénomène de la dégradation de la matière organique dans ces milieux.

Finalement, un Chapitre VI avec les modèles décrivant le comportement des stocks du carbone organique en fonction de la profondeur et de l'usage, permettra de bâtir un modèle théorique d'évolution des stocks en fonction de l'activité anthropique et des durées d'interventions sur la région, défini *a priori* par la communauté scientifique comme fragile.

CHAPITRE II

LES SITES D'ETUDE

Comme nous avons pu le voir dans le Chapitre I, la région de Coquimbo possède des caractéristiques géomorphologiques, géologiques et climatiques faisant d'elle la région appropriée pour notre étude.

En effet, l'usage des sols est extrêmement contrasté avec un secteur sous irrigation exploité de manière intensive et moderne tourné vers les marchés internationaux, et un secteur non irrigué (*secano*), en surfaces érodées tourné vers une agriculture marginale et vers l'élevage caprin (Pouget *et al.*, 1996). De plus, cette région détient d'une part, le pourcentage le plus élevé de surface irriguée par rapport à sa surface totale potentiellement irrigable et d'autre part, un manque d'information sur les effets de l'activité anthropique sur la quantité et la qualité des sols, notamment à travers leur contenu en matière organique (INE, 2007).

La description plus détaillée suivante, des critères de sélection et des caractéristiques de chaque site permettra de rendre compte de ces effets sur la matière organique.

Choix des sites

Dans le but de caractériser le comportement de la matière organique les sites d'échantillonnage de la région ont été choisis en stratifiant la région sur la base de plusieurs critères :

- un premier critère altitudinal sur un transect ouest-est, passant par les quatre grandes formations géomorphologiques présentes et décrites dans le chapitre précédent, à savoir la frange littorale (Las Cardas), les vallées fluviales (Talhuén, Flor del Norte, Camarico), la moyenne montagne ou interfleuve (El Palqui), et la haute montagne (Las Ramadas).

- un deuxième critère climatique, sur un gradient ascendant de température et de précipitation (ouest-est).

- un troisième critère, la classification taxonomique des sols dans la région d'après le Soil Survey Staff (1999). Tous les sols échantillonnés appartiennent au même grand groupe (Aridisol), et à trois Ordres différents : Cambid, (Haplocambid : Talhuén), Durid (Haplodurid : Las Cardas) et Calcid (Haplocalcid : Flor del Norte).

- un quatrième critère est le mode d'usage, le but étant de faire le rapport entre son intensité, sa durée, et les données qualitatives et quantitatives sur la matière organique.

I. Las Cardas

La zone d'étude fait partie d'une station expérimentale appartenant à la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université du Chili (Casanova *et al.*, 1995). Elle est située à 23 km à l'est de la côte et est à 45 km au nord de la ville d'Ovalle, dans la province d'Elqui, région de Coquimbo (71°15' S ; 30°13' W, 220 m d'altitude).

La température moyenne annuelle est de 16,5°C et la précipitation moyenne annuelle de 99,9 mm (tableau 2.1) (González, *et al.*, 2001).

Tableau 2.1. Paramètres climatiques de la zone de Las Cardas, région de Coquimbo.

ZONE DE LAS CARDAS														
Valeurs mensuelle de certains paramètres climatiques														
PARAMETRE	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	ANUELLE	UNITÉ
Température maximale	32,1	31,1	28,2	24,3	20,4	17,5	16,5	17,1	19,7	23,6	27,8	30,9	24,1	°C
Température minimale	14,2	13,7	12,4	10,5	8,7	7,4	6,9	7,4	8,3	10,2	12,1	13,6	10,5	°C
Température moyenne	22,1	21,4	19,4	16,6	13,9	11,9	11,2	11,7	13,4	16,1	19,0	21,3	16,5	°C
Humidité relative	75	75	76	78	79	80	80	79	78	77	76	75	77	%
Précipitations	0,1	0,7	0,5	2,3	21,9	30,1	21,4	15,3	4,2	2,7	0,5	0,2	99,9	mm
Evapotranspiration potentielle	138,7	131,6	112,0	85,4	58,7	39,2	32,1	39,2	58,8	85,4	112,1	131,6	1024,8	mm
Déficit hydrique	138,6	130,9	111,5	83,1	36,8	9,1	10,7	23,9	54,6	82,7	111,6	131,4	924,9	mm

À Las Cardas et d'après la carte géologique présentée dans le chapitre Contexte et objectif d'étude, on retrouve des dépôts sédimentaires d'origine continentale et marine (Cassard, 1999 ; Billa *et al.*, 2004). D'après Aburto *et al.*, (2008) les roches sources de ces sédiments sont des granites et des andésites des cordillères des Andes et côtière voisines. Les sols développés dans cette zone correspondent à des Typic Haplodurids selon l'US Soil Taxonomy (Luzio, 1986 ; Soil Survey Staff, 1999 ; Aburto *et al.*, 2008) avec la présence d'un horizon A sableux et un horizon B plus riche en argile (Soto *et al.*, soumis).

Géomorphologiquement, le site de Las Cardas se retrouve dans la frange littorale, cependant, il correspond à une terrasse en fond de vallée. Le relief est relativement plat avec des pentes maximales autour de 2% d'axe nord-sud.

L'échantillonnage de cette zone d'étude a été réalisé en fond de vallée, dans trois secteurs soumis à des modes d'usages différents, à savoir un secteur mis en réserve depuis 1973 (56,7 % de couverture végétale), deux secteurs de pâturage : un avec un usage extensif 6 Unité Petit Ruminant (UPR) par ha par année, $\text{UPR} \times \text{ha}^{-1} \times \text{année}^{-1}$, et l'autre sous usage intensif ($10 \text{ UPR} \times \text{ha}^{-1} \times \text{année}^{-1}$) (Figure 2.1).

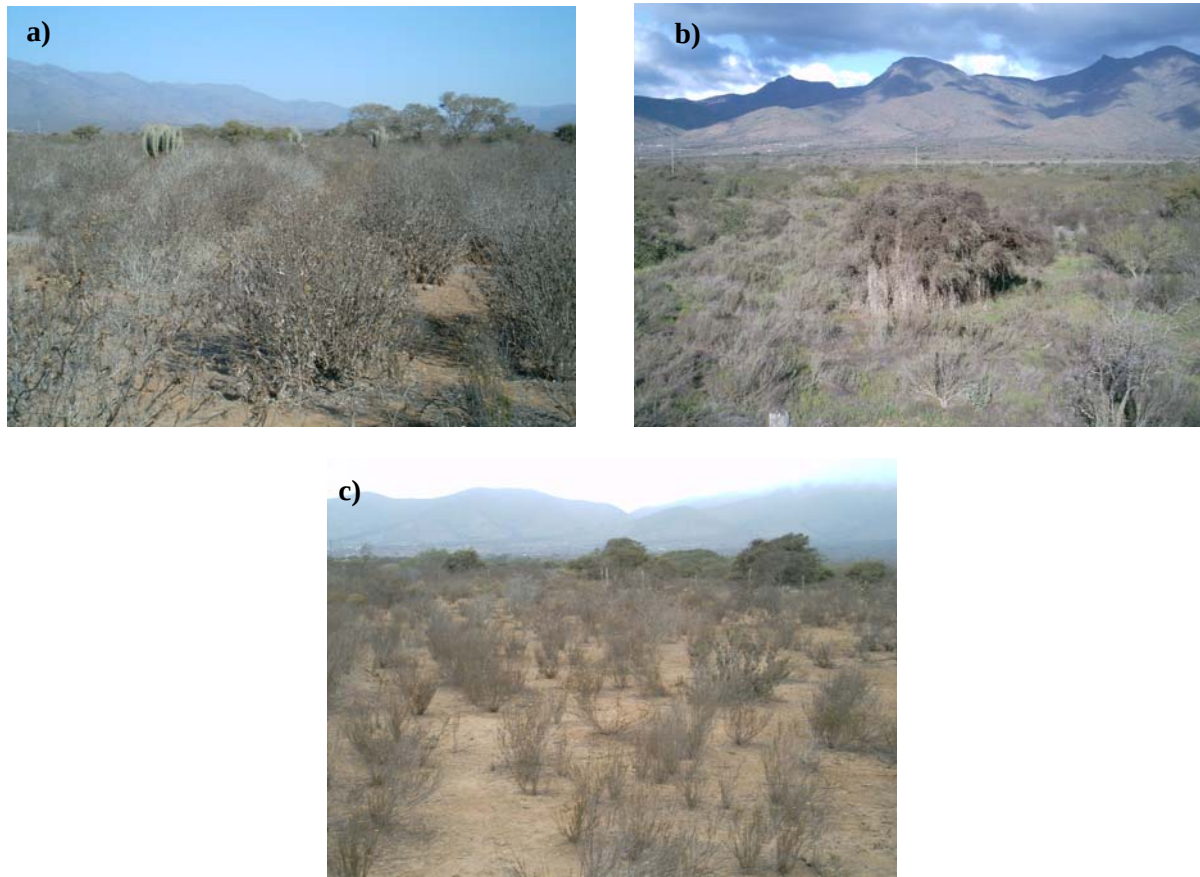


Figure 2.1. Photos de Las Cardas prises en été, a) secteur mis en réserve et b) secteur extensif, c) secteur sous agriculture intensive (pâturage).

II. Talhuén

Le bassin versant de Talhuén se situe à 5 km au nord de la ville d'Ovalle, province de Limarí, région de Coquimbo (30°35' S ; 71°15' W, 300 m d'altitude).

Les secteurs échantillonnés appartiennent à des propriétaires privés depuis plusieurs générations. Ceci représente un avantage puisque il est alors possible de retracer l'histoire de l'usage des sols.

La température moyenne annuelle est de 15,2°C et les précipitations moyennes annuelles de 128,7 mm (tableau 2.2) (González, *et al.*, 2001).

Tableau 2.2. Paramètres climatiques des zones de Talhuén, Flor del Norte et Camarico, région de Coquimbo.

ZONE DE TALHUÉN, FLOR DEL NORTE ET CAMARICO														
Valeurs mensuelle de certains paramètres climatiques														
PARAMETRE	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	ANUELLE	UNITÉ
Température maximale	28,5	27,8	25,7	23,0	20,2	18,2	17,5	17,8	19,6	22,3	25,3	27,6	22,8	°C
Température minimale	13,0	12,5	11,0	9,0	7,1	5,6	5,1	5,6	6,7	8,7	10,8	12,4	9,0	°C
Température moyenne	19,8	19,2	17,6	15,3	13,0	11,4	10,8	11,2	12,5	14,8	17,2	19,1	15,2	°C
Humidité relative	61	61	63	64	66	67	67	66	65	63	62	61	64	%
Précipitations	-	-	0,2	0,8	0,8	3,0	27,5	38,8	27,7	20,5	5,9	3,5	128,7	mm
Evapotranspiration potentielle	194,5	184,2	156,0	117,6	79,1	51,0	40,7	51,0	79,2	117,6	156,1	184,2	1411,2	mm
Déficit hydrique	61	61	63	64	66	67	67	66	65	63	62	61	64	mm

D'après la carte géologique on retrouve les mêmes types de dépôts que pour la zone de Las Cardas à savoir des sédiments d'origine continentale et marine. Cependant nous pouvons apporter des précisions quant à la lithologie de ces sédiments : grès, conglomérats, limons, argiles, lignites et tufs (Cassard, 1999 ; Billa *et al.*, 2004). Les dépôts observés dans la zone de Talhuén dérivent de l'altération des granites et des andésites des Cordillères des Andes et de la Côte (Oyarzún et Álvarez, 2001). Les sols correspondant sont des Haplocambids avec des caractéristiques vertiques (Luzio, 1986 ; Oyarzún et Álvarez, 2001).

Mis à part de répondre aux critères de sélection déjà énoncés, Talhuén présente la caractéristique importante et particulière d'avoir un secteur non exploité depuis 1957.

L'échantillonnage a été réalisé uniquement dans des secteurs soumis à deux types d'usages : le secteur non exploité avec des pentes de 1 à 7% d'axe nord-sud, et un secteur plat à 300 m d'altitude qui fait l'objet d'une culture intensive d'artichauts (usage intensif, 300 m d'altitude) (Figure 2.2).

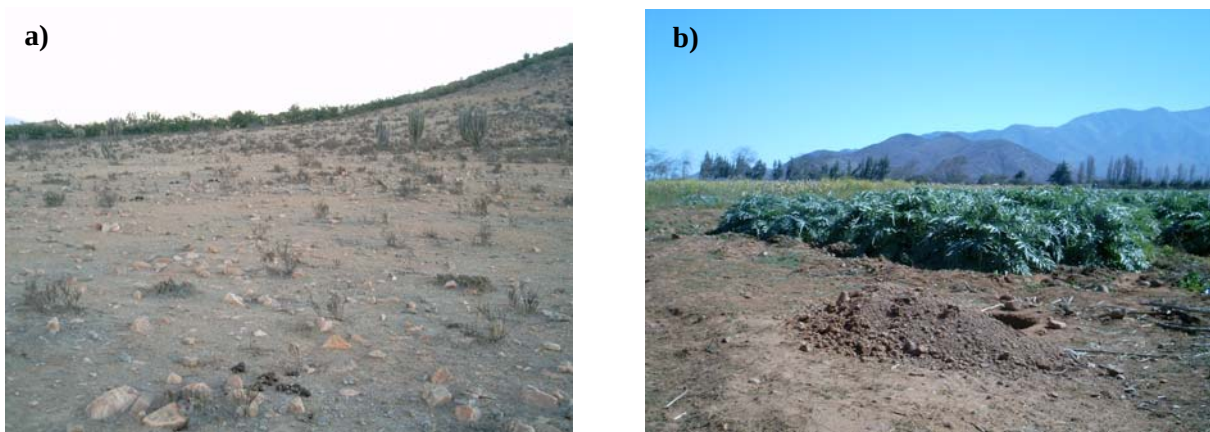


Figure 2.2. Photos de Talhuén prises en été, a) secteur non exploité et b) secteur sous agriculture intensive (culture d'artichauts).

III. Flor del Norte

La zone Flor del Norte est située à 7 km au nord de la ville d'Ovalle et fait partie du bassin versant de Talhuén ($30^{\circ}34' S$; $71^{\circ}15' W$, 300 m d'altitude). La zone échantillonnée, se situe sur une terrasse sédimentaire voisine à celle du secteur échantillonné précédemment.

Les caractéristiques de température et précipitation sont les mêmes que pour le site de Talhuén, i.e. $15,2^{\circ}C$ et 128,7 mm de pluie en moyenne annuelle (tableau 2.2).

La géologie et la lithologie correspondent donc également à celles de Talhuén, décrites dans le paragraphe précédent. Les sols sont des Haplocalcids avec un horizon pétrocalcique qui n'est présent que dans certaines parties de la zone (Luzio, 1986 ; Oyarzún et Álvarez, 2001).

La zone d'échantillonnage comprend deux secteurs sous deux modes d'usage différents : un secteur sans usage (depuis 1990 d'après le propriétaire), avec des pentes entre 1 et 4% d'axe nord-sud et un secteur plat, soumis à un usage intensif (noyers et prairies de luzerne). L'altitude du secteur est la même que celle de Talhuén (300 m) (Figure 2.3).

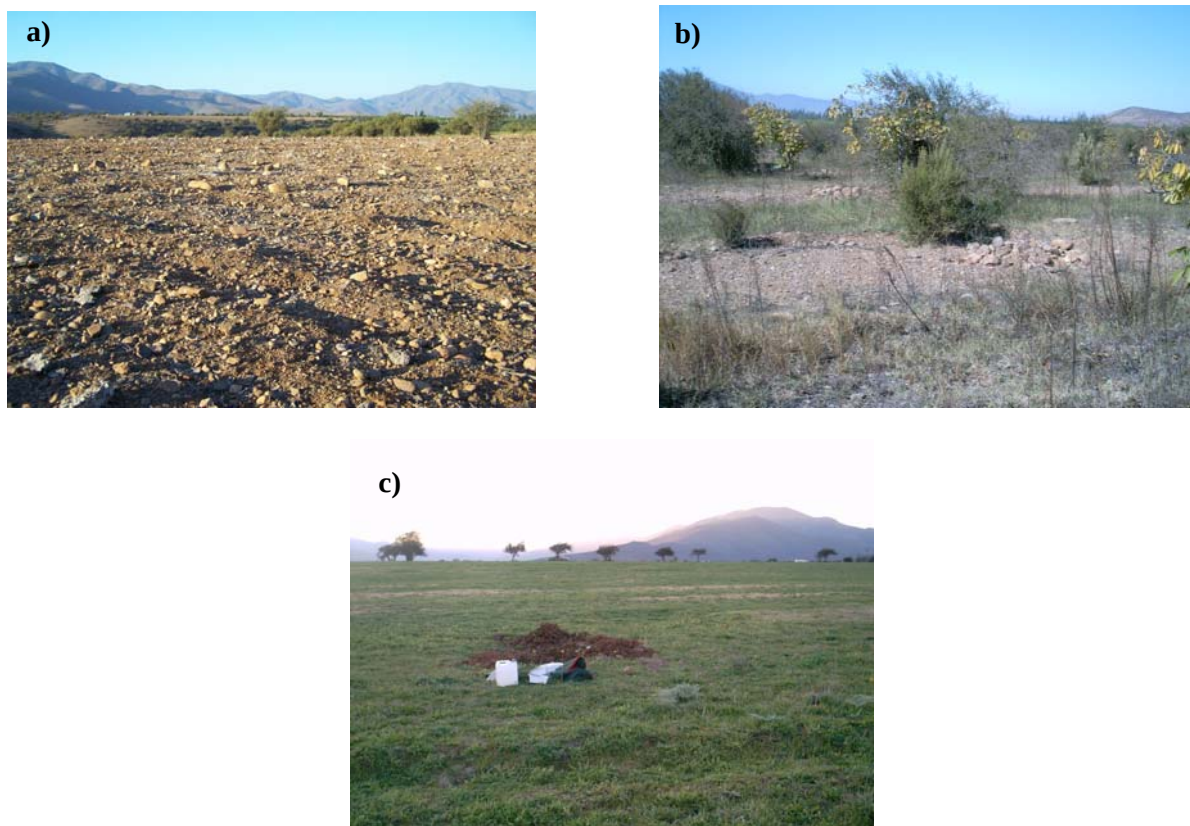


Figure 2.3. Photos de Flor del Norte prises en été, a) secteur non exploité et b) secteur sous agriculture intensive (culture de noyer), c) secteur sous agriculture intensive (luzerne).

IV. Camarico

La zone de Camarico est située à 21 km au sud-ouest de la ville d'Ovalle ($30^{\circ}45' \text{ S}$; $71^{\circ}20' \text{ W}$, 230 m d'altitude).

La géologie, la lithologie et les types de sols sont identiques à ceux de Talhuén, décrite dans les paragraphes précédents.

Les caractéristiques de température et précipitation restent les mêmes que pour le Talhuén et Flor del Norte (tableau 2.2).

La zone d'échantillonnage appartient à la société américaine Del Monte, et c'est un secteur soumis à un usage très intensif (vignobles). L'échantillonnage de ce site nous a donné la possibilité d'étudier le comportement du carbone organique dans le secteur soumis à la plus importante production de raisin de table de toute la province de Limarí (Peralta, 2005 ; Cortés, 2008). Toute la production est destinée à l'exportation (Figure 2.4).



Figure 2.4. Photos de Camarico prises en été, secteur sous agriculture intensive (vignoble).

V. El Palqui

La Zone d'El Palqui se situe à 32 km au sud-est de la ville d'Ovalle (30°34' S ; 70°55' W, 500 m d'altitude).

La géologie, la lithologie et les types de sols correspondent à ceux de Flor del Norte, décrits dans les paragraphes précédents.

La température moyenne annuelle s'élève à 14,6°C et les précipitations moyennes annuelles sont de 89,1 mm (tableau 2.3) (González, *et al.*, 2001).

Tableau 2.3. Paramètres climatiques de la zone d'El Palqui, région de Coquimbo.

ZONE D'EL PALQUI														
Valeurs mensuelle de certains paramètres climatiques														
PARAMETRE	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	ANUELLE	UNITÉ
Température maximale	24,7	23,3	21,4	19,5	18,1	17,6	17,7	18,8	20,7	22,9	24,6	21,2	20,9	°C
Température minimale	13,2	11,9	10,1	8,4	7,1	6,6	7,1	8,0	9,8	11,7	13,2	10,1	9,8	°C
Température moyenne	18,1	16,8	15,1	13,3	12,0	11,6	11,8	12,8	14,6	16,5	18,0	14,9	14,6	°C
Humidité relative	73	73	74	75	75	76	76	75	75	74	73	73	74	%
Précipitations	0,1	0,7	0,5	2,3	21,9	30,1	21,4	15,3	4,2	2,7	0,5	0,2	99,9	mm
Evapotranspiration potentielle	138,7	131,6	112,0	85,4	58,7	39,2	32,1	39,2	58,8	85,4	112,1	131,6	1024,8	mm
Déficit hydrique	138,6	130,9	111,5	83,1	36,8	9,1	10,7	23,9	54,6	82,7	111,6	131,4	924,9	mm

Comme pour Camarico, El Palqui concentre une importante activité agricole (vignoble), qui lui permet d'être le deuxième site régional pour la production de raisin de table, exportée vers l'Amérique du Nord (Peralta, 2005 ; Cortés, 2008).

L'échantillonnage donc a été réalisé sur un secteur d'usage très intensif (Figure 2.5).



Figure 2.5. Photos d'El Palqui prises en été, secteur sous agriculture intensive (vignoble).

VI. San Pedro de Pichasca

La Zone de San Pedro de Pichasca se situe à 38 km au nord-est de la ville d'Ovalle (30°23' S ; 70°53' W, 900 m d'altitude).

La température moyenne annuelle est de 14,1°C et les précipitations moyennes annuelles de 183,9 mm (tableau 2.4) (González, *et al.*, 2001).

Tableau 2.4. Paramètres climatiques de la zone de Pichasca, région de Coquimbo.

ZONE DE PICHASCA														
Valeurs mensuelle de certains paramètres climatiques														
PARAMETRE	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	ANUELLE	UNITÉ
Température maximale	24,6	24,0	22,3	20,0	17,8	16,1	15,5	15,7	17,1	19,4	21,9	23,9	19,9	°C
Température minimale	13,3	12,8	11,5	9,7	8,0	6,7	6,2	6,7	7,6	9,4	11,3	12,8	9,7	°C
Température moyenne	18,1	17,6	16,2	14,2	12,3	10,9	10,4	10,7	11,8	13,7	15,8	17,5	14,1	°C
Humidité relative	74	74	76	77	79	80	80	79	78	76	75	74	77	%
Précipitations	-	-	0,4	1,2	1,2	7,1	39,8	53,5	38,6	27,4	9,1	5,6	183,9	mm
Evapotranspiration potentielle	133,3	126,4	107,7	82,0	56,4	37,7	30,8	37,7	56,4	82,1	107,7	126,4	984,6	mm
Déficit hydrique	133,3	126,4	107,3	80,8	55,2	30,6	-	-	17,8	54,7	98,6	120,8	825,5	mm

D'après la carte géologique présentée dans le chapitre Contexte et objectif d'étude, on retrouve des dépôts sédimentaires d'origine continentale et marine ainsi que des roches volcaniques telles des andésites, des rhyolites, des tufs et des ignimbrites (Cassard, 1999 ; Billa *et al.*, 2004). Les sols développés dans cette zone correspondent à des Aridisols Haplocambids selon l'US Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999).

Le site de San Pedro de Pichasca se retrouve dans la zone géomorphologique de l'interfleuve. Les pentes sur ce site sont d'environ 3 à 9%.

L'échantillonnage de cette zone d'étude a été réalisé dans trois secteurs soumis à des modes d'usages différents, à savoir un secteur mis en réserve depuis 1981, deux secteurs agricoles : un avec un usage extensif (prairie à l'abandon, broutée exceptionnellement), et l'autre sous usage intensif (vignoble depuis 10 mois) (Figure 2.6).



Figure 2.6. Photos de San Pedro de Pichasca prises en été, a) secteur mis en réserve, b) secteur sous agriculture extensive (ancienne prairie abandonnée) et c) secteur sous agriculture intensive (vignoble).

VII. Las Ramadas

La zone d'étude fait partie d'une Hacienda. Elle est située à 74 km au sud-est de la ville d'Ovalle, dans la province de Limarí, région de Coquimbo (70°34' S ; 30°59' W, 1500 m d'altitude).

La température moyenne annuelle est de 15,4°C et les précipitations moyennes annuelles de 172,2 mm (tableau 2.5) (González, *et al.*, 2001).

Tableau 2.5. Paramètres climatiques de la zone de Las Ramadas, région de Coquimbo.

ZONE DE LAS RAMADAS														
Valeurs mensuelle de certains paramètres climatiques														
PARAMETRE	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	ANUELLE	UNITÉ
Température maximale	28,8	28,2	26,4	23,9	21,5	19,7	19,1	19,3	20,9	23,3	25,9	28,0	23,8	°C
Température minimale	13,3	12,7	11,0	8,6	6,3	4,6	4,0	4,6	5,9	8,3	10,7	12,6	8,6	°C
Température moyenne	20,1	19,5	17,8	15,6	13,3	11,6	11,0	11,4	12,8	15,1	17,5	19,4	15,4	°C
Humidité relative	53	53	54	56	57	58	58	57	56	55	54	53	55	%
Précipitations	-	-	0,3	1,6	1,1	7,3	33,2	46,6	36,3	31,1	8,3	6,4	172,2	mm
Evapotranspiration potentielle	217,0	205,8	175,1	133,3	91,4	60,8	49,6	60,8	91,5	133,3	175,2	205,8	1599,6	mm
Déficit hydrique	217,0	205,8	174,8	131,7	90,3	53,5	16,4	14,2	55,2	102,2	166,9	199,4	1427,4	mm

Les profils d'échantillonnage de Las Ramadas se répartissent dans deux zones géologiques distinctes. La première est composée des mêmes types de roches sédimentaires et volcaniques que la zone de San Pedro de Pichasca. La seconde correspond à des sédiments d'origine marine, tels des calcaires et des turbidites. (Cassard, 1999 ; Billa *et al.*, 2004). Dans cette zone, les sols développés sont des Aridisols Haplocambids selon l'US Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999).

Géomorphologiquement, le site de Las Ramadas se trouve au niveau de la Cordillère des Andes et présente de fortes pentes (15 à 30%).

L'échantillonnage de cette zone a été effectué dans trois secteurs soumis à des modes d'usages différents, un secteur sans usage, deux secteurs agricoles : un avec un usage extensif (noyers de 8 mois), et l'autre sous usage intensif (noyers de 10 ans) (Figure 2.7).



Figure 2.7. Photos de Las Ramadas prises en été, a) secteur mis en réserve, b) secteur sous agriculture extensive (noyers de 8 mois) et c) secteur sous agriculture intensive (noyers de 10 ans).

CHAPITRE III

MATERIEL ET METHODES

Dans ce chapitre, notre objectif est de présenter pour chaque site le nombre de sols étudiés et les usages qui s'y rapportent, ainsi que les méthodes employées tant sur le terrain qu'au laboratoire pour caractériser ces sols.

I. Les sols étudiés pour chaque site

Au sein de chaque site, nous avons sélectionné plusieurs sols afin de caractériser la matière organique (tableau 3.1).

Ainsi, pour la zone de Las Cardas, nous avons étudié 3 profils de sol localisés dans le secteur mis en réserve depuis 1973, 4 autres profils de sol localisés dans le secteur en pâturage que l'on a qualifié d'extensif et encore 3 autres profils de sol dans le secteur en pâturage que l'on a qualifié de moins intensif.

Pour le site de Talhuén, l'étude s'est portée sur 8 profils de sol dans un secteur mise en réserve et 2 profils de sol dans un secteur de culture d'artichauts, que nous avons classé d'usage intensif.

Pour Flor del Norte, nous avons étudié 2 profils de sol dans un secteur mis en réserve depuis 1990. 4 autres profils de sols ont été analysés dans un secteur avec des noyers et de la luzerne, dit sous usage intensif.

Dans la zone de Camarico, l'étude a été menée sur 19 profils de sol d'un secteur agricole où sont cultivés des vignobles. Ce secteur est ainsi qualifié d'usage intensif.

Pour El Palqui, l'étude s'est portée sur 20 profils de sol localisés dans un unique secteur, voué également à une forte activité viticole, ce qui permet de le qualifier d'intensif.

A San Pedro de Pichasca, 4 profils de sol ont été étudiés dans un secteur mis en réserve depuis 1981, 2 autres dans un secteur pâturé qualifié d'intensif et enfin 2 profils au niveau d'un vignoble et donc dans un secteur qualifié d'intensif.

La zone de Las Ramadas, a été le lieu d'étude de 2 profils de sol dans un secteur mis en réserve, 2 profils dans un secteur avec des noyers de 8 mois, dit extensif, et enfin 4 profils de sols au niveau de noyers âgés de 10 ans qualifié d'intensif.

Comme il a été signalé dans le Chapitre II, l'échantillonnage a été organisé sur la base d'une stratification de la région au moyen de la superposition de différentes couches d'information à savoir :

- Carte géomorphologique (Paskoff, 1993)
- Carte géologique (Cassard, 1999 ; Billa *et al.*, 2004)
- Carte des sols (Luzio, 1986)
- Carte de températures (González *et al.*, 2001)
- Carte des précipitations (González *et al.*, 2001)
- Usage

Tableau 3.1. Distribution du nombre de profils par site échantillonné et mode d'usage.

Site	Surface (ha)	Usage			Nombre de profils
		sans	extensif	intensif	
Las Cardas	15	3	4	3	10
Talhuén	21	8	-	2	10
Flor del Norte	15	2	-	4	6
Camarico	42	-	-	19	19
El Palqui	45	-	-	20	20
Pichasca	21	4	2	2	8
Las Ramadas	18	2	2	4	8

Dans chaque fosse pédologique les échantillons ont été prélevés selon la variable à étudier :

Carbone organique total (COT) : dans le but d'établir la distribution de COT tout au long du profil, des échantillons de 50 gr tamisés à 2 mm ont été prélevés tous les 5 cm pour les 10 premiers cm, ensuite sur des intervalles de 10 cm jusqu'à 1 m de profondeur

Densité apparente : 6 répétitions d'échantillonnage de mottes ont été faites pour chaque horizon.

CEC et granulométrie : la détermination de la CEC et la granulométrie a été faite par horizon.

II. Description des profils de sols

La description de chaque profil de sol a été faite à partir de fosses pédologiques d'environ 1 m de profondeur s'appuyant sur le manuel de reconnaissance des sols de Schlatter *et al.* (2003) et Baize et Jabiol (1995), et décrit ensuite au moyen d'une Charte Munsell (Color Munsell, 2000).

Les paramètres de description choisis ont été les suivants :

- Dates et antécédents climatiques
- Situation géomorphologique et topographique
- Géologie
- Occupation du sol. Végétation naturelle.
- L'état de l'humidité
- Les couleurs
- La texture
- Les éléments grossiers
- La structure des horizons
- La porosité
- Les propriétés mécaniques (test de plasticité, test d'adhésivité, test de friabilité)
- L'effervescence à HCl

Ont ainsi été identifiés les principaux horizons des profils de sols étudiés.

III. Densité apparente

La plupart des profils étudiés présentant une teneur élevée en éléments grossiers, la détermination de la densité apparente n'a pas été chose aisée à réaliser. Nous avons choisi de réaliser des mesures de densité apparente sur des mottes de dimensions centimétriques en tenant compte de la proportion volumique d'éléments grossiers pour passer de la densité apparente mesurée sur les mottes à une valeur estimée à l'échelle de l'horizon.

Les mesures de densité apparente sur mottes issues de chaque horizon ont été réalisées à l'aide de la méthode au pétrole (Monnier *et al.*, 1973 ; Assouline *et al.*, 2000). La densité apparente (D_a^m) est donnée par la relation :

$$D_a^m = \frac{m_s \times \rho_k}{m_k \times \rho_w}$$

Avec m_k , masse de kerdane en g (éther de pétrole) déplacée par l'échantillon, m_s , masse de l'échantillon en g séché à 105°C, ρ_k , masse volumique du kerdane (0,754 g·cm⁻³) et ρ_w , masse volumique de l'eau (1 g·cm⁻³). Les valeurs moyennes ont été obtenues à partir de six mottes (répétitions), par horizon.

IV. Teneur en éléments grossiers

La proportion volumique d'éléments grossiers (> 2mm) a été déterminée pour chaque horizon sur le terrain à l'aide d'une charte Munsell.

V. Granulométrie

Des échantillons ont été prélevés dans chaque horizon. Après tamisage à 2 mm, la fraction fine a fait l'objet d'une analyse granulométrique en 5 fractions selon la méthode dite à la pipette de Robinson après prétraitement des échantillons avec du peroxyde et sodium hexaphosphate (Halitim *et al.*, 1984, Baize, 2000). Ces analyses ont été réalisées au laboratoire d'analyse des sols de l'INRA à Arras.

VI. Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique (CEC) a été déterminée sur les mêmes échantillons que ceux utilisés pour la détermination de la composition granulométrique. La méthode employée est la méthode à la cobaltihexamine (Ciesielski et Sterckeman, 1997). La détermination de la concentration en ions cobaltihexamine $(\text{Co}(\text{NH}_3)_6)^{3+}$ restée en solution après échange avec l'échantillon permet de calculer la quantité fixée sur ce dernier, et d'en déduire la valeur de sa CEC.

VII. La pyrolyse Rock-Eval

Cette méthode de caractérisation de la matière organique a été développée par les pétroliers afin de déterminer le potentiel d'une roche mère. Par la suite, cette méthode de pyrolyse Rock-Eval a permis d'évaluer l'état d'oxydation des charbons (Copard *et al.*, 2002) et de distinguer la présence de matières organiques anciennes ou remaniées, dans des humus actuels (Di-Giovanni *et al.*, 1998). Plus récemment, Disnar *et al.*, (2003) et Sebag *et al.*, (2005) l'ont employée pour différents types de sols développés sous climat tempéré.

Pour les sols étudiés, des échantillons ont été prélevés de 0 à 5 cm et de 5 à 10 cm de profondeur, puis tous les 10 cm. Ces échantillons ont ensuite été tamisés à 2 mm préalablement à l'analyse Rock-Eval.

VII.1. Principe

La pyrolyse Rock-Eval consiste en un traitement thermique de l'échantillon permettant d'extraire par thermo-vaporisation les hydrocarbures (HC) libres présents dans la roche et par craquage thermique les hydrocarbures potentiellement présents dans le kérogène. Les produits obtenus sont enregistrés à la sortie du four par des détecteurs et peuvent ainsi être quantifiés. L'opération conduit à la production de plusieurs pics qui correspondent respectivement aux hydrocarbures libres (S_1), aux hydrocarbures libérés par craquage (S_2), au CO_2 et au CO

produits conjointement lors du craquage, ainsi qu'au CO et au CO₂ produit lors du cycle d'oxydation (S₄). Les détecteurs utilisés sont l'ionisation de flamme « FID » (Flame Ionization Detector) pour les hydrocarbures, et la conductivité thermique ou les cellules infrarouges pour le CO₂ et le CO.

VII.2. Méthode

L'ensemble des échantillons de l'étude a subi le même mode opératoire et cycle d'analyse (cycle RecentSM) qui peut se décrire comme suit d'après le schéma du circuit (Figure 3.1)

VII.2.a. Première phase

Une aliquote de l'échantillon est broyée puis pesée (environ 100 mg) dans une nacelle perméable au gaz, puis introduite dans le four qui est maintenu à une température constante de 200 °C pendant une durée standard de quelques minutes, sous balayage inerte (N₂). Les hydrocarbures libres sont expulsés pendant cette phase isothermique.

VII.2.b. Deuxième phase

Toujours sous atmosphère inerte, la température du four est élevée progressivement et selon un gradient de 30 °C/min, jusqu'à atteindre les 650 °C. Dans cette gamme de température, le kérogène subit la phase de craquage thermique et libère les hydrocarbures potentiels et du CO et du CO₂.

VII.2.c. Troisième phase

L'échantillon est transféré dans le four à oxydation, où il est oxydé en présence d'oxygène. Le résidu organique de la pyrolyse est alors entièrement transformé en CO et CO₂.

Là encore, l'échantillon est soumis à une température constante pendant une durée déterminée (400 °C – 3 min), puis une augmentation graduelle (30 °C/min), jusqu'à la température de 700 °C.

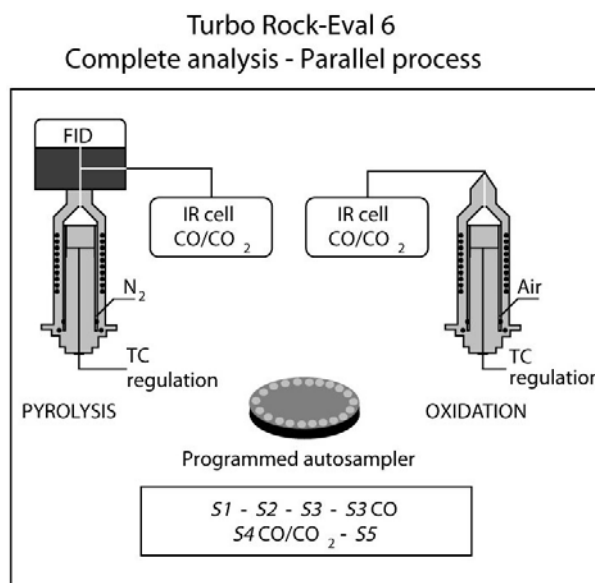


Figure 3.1. Vue d'ensemble du Rock-Eval 6 Turbo (a) et schéma de son circuit d'analyse (b) (d'après Behar *et al.*, 2001).

VII.3. Définition des paramètres

Les paramètres du Rock-Eval sont basés sur l'intégration, entre des bornes de température définies, des quantités de composés hydrocarbonés, CO et CO₂ produites lors du craquage de la matière organique (Espitalié *et al.* 1977, 1985a, 1985b, Lafargue *et al.*, 1998).

VII.3.a. Les paramètres initiaux

a) $C S_1$ et S_2

S_1 et S_2 correspondent à la quantité de composés hydrocarbonés produits pendant la pyrolyse. Ils sont exprimés en $\text{mg HC} \cdot \text{g}^{-1}$ échantillon.

S_1 correspond aux hydrocarbures initialement libres dans les échantillons et est utilisé le plus souvent pour l'analyse des roches mères pétrolières. En revanche S_2 correspond aux hydrocarbures libérés par craquage de la MO.

b) $S_3\text{CO}$

Le $S_3\text{CO}$ est la quantité de CO produite par la matière organique lors de la pyrolyse. Selon Lafargue *et al.*, (1998) la borne supérieure d'intégration du $S_3\text{CO}$ est fixée à 500°C pour éviter la réaction de Boudouard ($\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$) qui intervient au-delà de cette température. Dans la dernière version du fichier de calcul utilisé par le logiciel Rock6 (rocksix.prb), la borne supérieure de mesure du CO organique produit en pyrolyse ($S_3\text{CO}$) correspond à la température de production minimale enregistrée entre 450 et 600°C. La méthode d'analyse que nous avons utilisée s'appelle RECENTSM. Le $S_3\text{CO}$ est exprimé en $\text{mg CO} \cdot \text{g}^{-1}$ d'échantillon.

c) $S_3\text{CO}_2$

Le $S_3\text{CO}_2$ est la quantité de CO_2 produite entre 200 et 400°C pendant le cycle de pyrolyse. La limite supérieure à 400°C permet d'éviter l'intégration, dans le calcul du $S_3\text{CO}_2$, de CO_2 provenant de carbonates fragiles, se décomposant précocement durant la montée de température (e.g. sidérite). Le $S_3\text{CO}_2$ est exprimé en $\text{mg CO}_2 \cdot \text{g}^{-1}$ échantillon.

d) $S_4\text{CO}$ et $S_4\text{CO}_2$

$S_4\text{CO}$ et $S_4\text{CO}_2$ correspondent aux quantités de CO et de CO_2 libérées et mesurées pendant le cycle d'oxydation, jusqu'à 650°C.

VII.3.b. Les paramètres usuels

Comme nous l'avons vu précédemment la quantification des produits émis correspond à des pics. Par intégration des surfaces correspondantes, des paramètres secondaires plus usuels peuvent être définis (Espitalié *et al.*, 1985_b, 1986).

a) TpS₂ (T_{max})

La température maximale de pyrolyse ou (TpS₂) correspond à la température de formation maximale d'hydrocarbures au cours de la pyrolyse, elle est mesurée au sommet du pic S₂.

T_{max} est l'équivalent du TpS₂ obtenu sur les analyseurs Rock-Eval plus anciens de type II ou III. Le Rock-Eval 6 le recalcule comme suit : $T_{max} = TpS_2 - (30 \text{ à } 40 \text{ } ^\circ\text{C})$.

Cette valeur fournit une mesure de la maturité thermique de la matière organique. Plus TpS₂ ou T_{max} sont élevées, plus la maturité thermique est avancée, étant donné que les fractions les plus facilement pyrolysables sont absentes des échantillons les plus matures (Barker, 1974; Espitalié *et al.*, 1977).

Lors d'une étude de la matière organique récente, l'augmentation des valeurs de ce paramètre correspond au craquage successif de composants organiques présentant des stabilités différentes (Disnar, 1982; Disnar et Trichet, 1984).

La déconvolution du pic S₂ permet de mettre en évidence ces différents craquages et donc les types de composants organiques.

Le premier pic, peu fréquent, entre 300 et 320°C correspond aux constituants biologiques thermo-labiles. Le second pic entre 360 et 370°C est souvent observé dans les litières (O_L et O_F) et caractérise la cellulose et/ou la lignine, ou d'autres polymères comme les polypeptides. La pyrolyse de ces composants biologiques s'achève vers 400°C alors que celle des composants humiques atteint les 420°C (440-470°C pour les horizons A et B).

b) Carbone Organique Total « COT »

C'est la teneur en carbone organique du sédiment ou du sol analysé.

Le COT est calculé à partir de la somme du carbone organique résiduel et du carbone organique pyrolysé. Le carbone organique pyrolysé est calculé à partir des composés hydrocarbonés des pics S_0 , S_1 et S_2 . Il est exprimé en % en poids d'échantillon sec.

c) Indice d'Hydrogène « IH »

L'IH correspond à la valeur du pic S_2 normalisé par rapport au COT. C'est le poids d'hydrocarbures en milligrammes produit par pyrolyse par gramme de COT.

Il se corrèle au rapport atomique H/C de la MO.

d) Indice d'Oxygène « IO »

L'IO représente la valeur du pic S_3 . C'est le poids de CO_2 en milligrammes produit par la pyrolyse d'un gramme de COT.

Il se corrèle avec le rapport atomique O/C du kérogène.

A partir de ces paramètres et de la construction de diagramme de type IH/IO, comparable au diagramme de Van Krevelen (H/C et O/C), il a été classiquement admis dans les roches-mères d'hydrocarbures trois types de matières organiques (I, II et III) selon leur nature. L'origine de la matière organique de type I est lacustre, celle dite de type II est marine et celle dite de type III est continentale. Cette information fournie à titre d'information ne présente guère d'intérêt pour des sols.

VII.3.c. Le paramètre R400

Ce paramètre est défini comme la proportion de MO la plus labile pyrolysée avant 400°C, soit la part du pic S_2 de pyrolyse intégré entre 200 et 400°C. De ce fait le R400 est un nombre sans dimension compris entre 0 et 1.

Comme nous avons pu le voir précédemment, les composés organiques ont des températures de craquage différentes selon leur nature.

En effet, de faibles températures de craquage (320 à 390°C) trouvées dans les niveaux supérieurs de sols (O_L , O_F et quelques O_H) étudiés par Disnar *et al.*, (2003) sont typiques du craquage thermique de constituants, tels les polysaccharides et la lignine. Au contraire, des températures comprises entre 420 et 470°C observées dans les horizons A et B sont caractéristiques de substances humiques immatures.

CHAPITRE IV

LES SOLS DES SITES ETUDIES

Dans ce chapitre, nous présenterons les caractéristiques morphologiques, physiques et chimiques des sols étudiés dans les différents sites sélectionnés. Un ensemble de 82 profils de sols a ainsi été sectionné dans toute la région.

I. Les sols des sites étudiés

I.1. Las Cardas

Dans le but d'obtenir des résultats comparables avec d'autres études faites au préalable, la description et les estimations des stocks de carbone organique ont été faites sur des profils d'un mètre de profondeur creusés sur trois secteurs différents sous trois type d'usage : (a) un secteur préservé de 5 ha, (b) un secteur sous pâturage extensif (6 Unité Petit Ruminant (UPR) $\times$ ha⁻¹ $\times$ année⁻¹) et (c) un secteur sous pâturage intensif (10 UPR $\times$ ha⁻¹ $\times$ année⁻¹).

Les profils présentent une distribution verticale d'horizons assez semblable, quelque soit l'usage du sol. On observe ainsi verticalement depuis la surface :

- Une litière discontinue dont l'épaisseur peut atteindre 1,5 cm. Cette litière est pratiquement absente sous pâturage intensif, très discontinue sous pâturage extensif et discontinue dans le secteur préservé
- Un horizon faiblement organique (horizon A) de 20 à 35 cm suivant les profils
- Puis un horizon B/C plus ou moins différencié selon les profils
- Et enfin un horizon C.

Les horizons présentent des couleurs allant du 7,5 YR 3/4 (brun foncé) au 7,5 YR 2,5/2 (brun très foncé) ou au 7,5 YR 4/6 (brun prononcé). A l'exception des horizons de surface, l'une des caractéristiques des horizons de ces sols est leur teneur élevée en éléments grossiers (tableau 4.1). Les analyses granulométriques montrent que la teneur en argile augmente avec la profondeur. La capacité d'échange cationique (CEC) augmente aussi avec la teneur en argile, sans doute en raison de l'augmentation de cette fraction. Si l'on fait l'hypothèse que la CEC est pour l'essentiel due à la fraction argile (elle-même est

essentiellement constituée de minéraux argileux), on peut calculer une capacité d'échange de la fraction argile cmol de charge + par kg d'argile granulométrique. On a ainsi obtenu des valeurs de capacité d'échange variant de 6,66 à 33,5 cmol₊ · kg⁻¹ selon les horizons dans ces sols.

Les analyses de densité apparente mesurée sur mottes de taille centimétrique ont montré qu'elle augmente avec la profondeur pour l'ensemble des profils (tableau 4.1). Par ailleurs, dès la surface, les valeurs de densité apparente enregistrées sont élevées. Ceci s'explique par la texture très sableuse des horizons (sables grossiers) et la présence de nombreux graviers de petite taille dans les mottes sélectionnées (2 à 5 mm). Ainsi s'expliquerait que nos valeurs de densité apparente soient beaucoup plus élevées que celles mesurées dans d'autres sols sableux de milieux arides ou semi-arides. C'est par exemple le cas des sols étudiés par Stavi *et al.*, (2008) qui ont enregistré des valeurs de densité apparente qui vont de 1,4 à 1,5 g·cm⁻³ dans les 10 premiers cm de sols de la région du Néguev (climat semi-aride).

I.1.a. Le secteur sans usage

Le secteur préservé a fait l'objet de 3 profils distribués aléatoirement sur une surface de 5 ha. Les couleurs sous conditions humides de ces profils évoluent de 7,5 YR 3/3, 7,5 YR 3/4 (brun foncé) à 7,5 YR 3/4, 7,5 YR 4/6 (brun prononcé), on peut noter un éclaircissement en profondeur (Figure 4.2). La densité apparente des échantillons de taille centimétrique varie de 1,58 à 2,09 g·cm⁻³ tout en augmentant avec la profondeur pour les trois profils. Ceci est en accord avec sans doute l'augmentation de la teneur en graviers de petite taille dans les échantillons. A cette hypothèse impliquant un accroissement de la teneur en graviers, il faut aussi en coupler une autre impliquant les conséquences de l'accroissement de la teneur en argile dans une matrice sablo-graveleuse. En effet, l'accroissement de la teneur en argile a pour effet une augmentation du volume occupé par des particules de taille inférieure à 2 µm entre les grains grossiers (sables et graviers) et par conséquent, à la fois une diminution de la porosité et une augmentation de la densité apparente. Enfin, on note que l'accroissement de la CEC en profondeur se corrèle à celui de la teneur en argile granulométrique ($R^2 = 0,88$), (Figure 4.1).

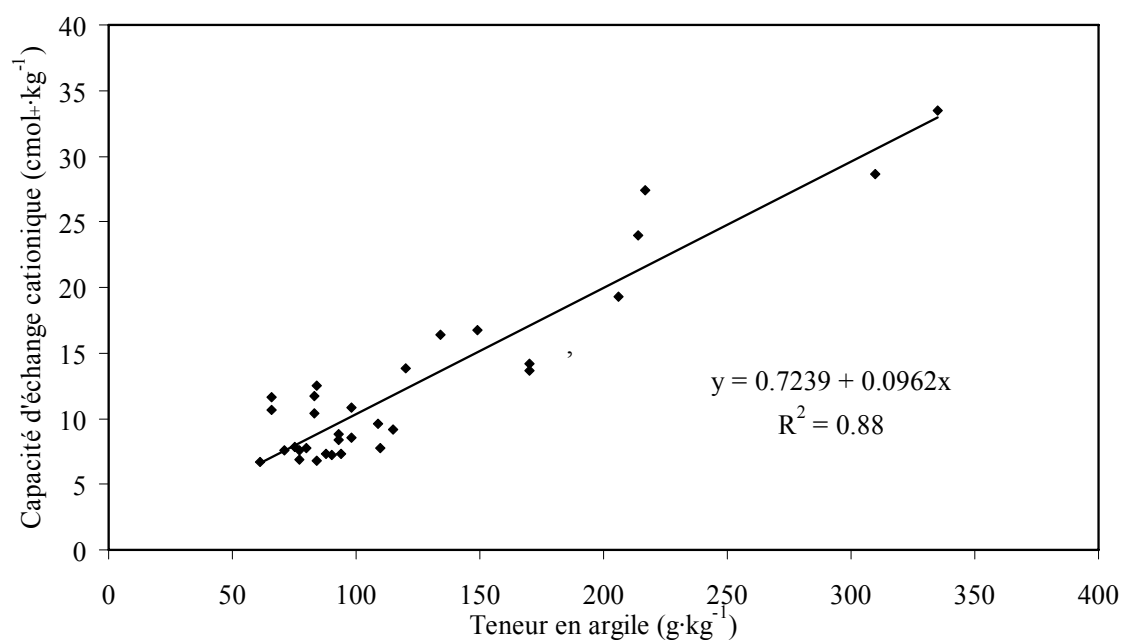


Figure 4.1. Relation entre la teneur en argile et la capacité d'échange cationique de Las Cardas.

I.1.b. Le secteur sous usage extensif

Sur ce secteur, 4 profils distribués de manière aléatoire sur une surface de 5 ha ont été étudiés. Les couleurs des différents horizons observées sous condition humide vont de 7,5 YR 3/2 (brun foncé) à 7,5 YR 2,5/3 (brun très foncé) en surface et de 7,5 YR 4/3 (brun) à 7,5 YR 3/2 (brun foncé) en profondeur (Figure 4.3). Les densités apparentes évoluent de 1,47 à 2,05 g·cm⁻³ entre 0 et 100 cm de profondeur. De telles variations sont une nouvelle fois à mettre en relation avec l'accroissement de la teneurs en graviers de petite taille dans les échantillons de taille centimétrique à partir desquels ont été réalisées les mesures de densité apparente, ainsi que la conséquence de l'augmentation de la teneur en argile. De la même façon que pour le secteur préservé, la CEC et les teneurs en argile augmentent avec la profondeur.

I.1.c. Le secteur sous usage intensif

Dans un secteur de 3 ha de surface, trois profils ont été étudiés. Les couleurs des différents horizons varient entre 7,5 YR 3/4 (brun foncé), 7,5 YR 2,5/1 (noir) et 7,5 YR 4/3 (brun). Exceptionnellement on retrouve un profil avec un horizon foncé en profondeur. Cela s'explique par la présence d'un horizon induré (Figure 4.4). Les densités apparentes évoluent de 1,68 à 2,19 g·cm⁻³ entre 0 et 100 cm de profondeur. De telles variations sont une nouvelle fois à mettre en relation avec l'accroissement de la teneurs en graviers de petite taille dans les échantillons de taille centimétrique à partir desquels ont été réalisées les mesures de densité apparente, ainsi que la conséquence de l'augmentation de la teneur en argile.

Tableau 4.1. Caractéristiques générales des sols de la zone de Las Cardas.

Profil	Profondeur	Couleur		Densité apparente	Proportion d'éléments grossiers	Granulométrie (mm)			Capacité d'échange cationique	
		Sec	Humide			<0,002	0,002-0,05	0,05-2		
		cm				g·cm ⁻³	cm ³ ·cm ⁻³	g·kg ⁻¹		cmol ⁺ ·kg ⁻¹
Sans usage										
9	0 - 5	10YR 4/4	7,5YR 3/3	1,69	0,10	77	229	694	6,86	
	5 - 30	7,5YR 4/4	7,5YR 3/4	1,98	0,05	93	212	695	8,34	
	30 - 55	7,5YR 4/3	7,5YR 3/3	2,01	0,03	134	163	703	16,4	
	55 - 90	7,5YR 4/3	7,5YR 3/4	2,09	0,02	217	195	588	27,4	
	90 - 100	7,5YR 5/4	7,5YR 3/4	-	0,02	29	97	874	27,8	
12	0 - 5	7,5YR 5/4	7,5YR 3/4	1,85	0,05	90	256	654	7,19	
	5 - 20	7,5YR 4/4	7,5YR 3/3	1,56	0,05	115	236	649	9,16	
	20 - 57	7,5YR 4/6	7,5YR 3/4	2,05	0,25	170	219	611	13,7	
	57 - 100	7,5YR 5/4	7,5YR 3/4	2,04	0,10	214	232	554	24,0	
13	0 - 6	7,5YR 4/3	7,5YR 3/3	1,58	0,05	77	236	687	7,58	
	6 - 35	7,5YR 4/4	7,5YR 2,5/2	1,76	0,05	98	210	692	10,8	
	35 - 85	7,5YR 4/3	7,5YR 3/3	-	0,30	149	156	695	16,7	
	85 - 100	7,5YR 4/4	7,5YR 4/6	-	0,05	310	198	492	28,6	
Usage extensif (6 U.P.R ×ha ⁻¹ ×année ⁻¹)										
1	0 - 5	10YR 4/4	7,5YR 3/2	1,47	0,03	94	252	654	7,35	
	5 - 12	10YR 4/4	10YR 3/3	1,73	0,03	88	227	685	7,28	
	12 - 40	10YR 3/4	7,5YR 3/3	1,73	0,03	93	229	678	8,82	
	40 - 100	10YR 3/6	7,5YR 3/3	1,99	0,03	170	239	591	14,2	
2	0 - 5	10YR 4/4	7,5YR 3/2	1,55	0,03	98	262	640	8,52	
	5 - 39	10YR 4/6	7,5YR 3/2	1,83	0,03	110	264	626	7,72	
	39 - 100	10YR 3/6	7,5YR 3/2	2,05	0,03	206	226	568	19,3	
4	0 - 7	10YR 4/4	7,5YR 3/2	1,52	0,08	80	276	644	7,73	
	7 - 24	7,5YR 4/3	7,5YR 3/2	1,77	0,03	75	233	692	7,84	
	24 - 45	10YR 4/6	7,5YR 3/2	1,77	0,15	83	217	700	10,4	
	45 - 77	10YR 3/4	7,5YR 3/2	1,87	0,50	83	185	732	11,7	
	77 - 100	10YR 5/4	7,5YR 3/3	2,05	0,00	77	221	702	21,8	
6	0 - 5	7,5YR 4/6	7,5YR 2,5/3	1,64	0,05	-	-	-	-	
	5 - 35	7,5YR 4/6	7,5YR 3/3	2,05	0,03	-	-	-	-	
	35 - 60	7,5YR 3/3	7,5YR 2,5/3	-	0,25	-	-	-	-	
	60 - 100	7,5YR 4/4	7,5YR 4/3	-	0,03	-	-	-	-	
Usage intensif (10 U.P.R ×ha ⁻¹ ×année ⁻¹)										
5	0 - 10	10YR 4/4	7,5YR 2,5/2	1,78	0,07	61	196	743	6,66	
	10 - 40	7,5YR 4/6	7,5YR 2,5/3	2,02	0,03	71	187	742	7,59	
	40 - 60	10YR 4/4	7,5YR 2,5/3	2,14	0,25	66	123	811	10,7	
	60 - 85	10YR 3/4	7,5YR 2,5/2	-	0,10	66	130	804	11,6	
	85 - 100	10YR 3/6	7,5YR 4/3	-	0,55	84	119	797	12,5	
7	0 - 5	7,5YR 4/6	7,5YR 3/4	1,68	0,05	84	329	587	6,75	
	5 - 35	7,5YR 4/4	7,5YR 4/3	1,88	0,70	109	244	647	9,58	
	35 - 50	7,5YR 4/6	7,5YR 3/3	2,08	0,15	120	236	644	13,8	
	50 - 80	7,5YR 4/3	7,5YR 3/4	2,19	0,02	335	250	415	33,5	
	80 - 100	7,5YR 4/2	7,5YR 3/2	2,05	0,02	41	226	733	23,3	
8	0 - 25	10YR 5/4	7,5YR 3/3	1,99	0,03	-	-	-	-	
	25 - 95	7,5YR 4/3	7,5YR 3/3	1,62	0,40	-	-	-	-	
	95 - 100	7,5YR 3/1	7,5YR 2,5/1	-	0,15	-	-	-	-	



Figure 4.2. Profil du secteur sans usage, zone de Las Cardas, région de Coquimbo, Chili.



Figure 4.3. Photo profil sous usage extensif, zone de Las Cardas, région de Coquimbo, Chili.



Figure 4.4. Profil et environnement sous usage intensif, zone de Las Cardas, région de Coquimbo, Chili.

I.2. Zone de Talhuén

Dix profils ont été étudiés sur deux secteurs à usages différents : (i) un ensemble de 8 profils sur un secteur sans usage de 17 ha et (ii) 2 autres profils dans un secteur cultivé (culture d'artichauts) de 4 ha. Les couleurs des horizons en surface varient de 5 YR 5/3 (brun rougeâtre) à 5 YR 3/3 (brun rougeâtre foncé), à 5 YR 6/6 (jaune rougeâtre), 5 YR 4/6 (rouge jaunâtre) à 100 cm de profondeur. Comme pour le site de Las Cardas, les sols du site de Talhuén présentent une distribution verticale analogue des horizons quel que soit l'usage. Les sols étudiés sont comme ceux du site de Las Cardas des sols peu évolués et présentent une succession verticale de type horizon A, horizons B ou B/C et horizon C. Dans le secteur cultivé, les profils présentent un horizon B épais alors qu'il est absent ou très réduit dans le secteur sous parcours. A noter que l'on observe une faible augmentation de la teneur en argile entre les horizons de surface et les horizons B (tableau 4.2).

I.2.a. *Le secteur sans usage*

Un ensemble de 7 profils a été étudié dans le secteur sans usage. Ces profils ont été distribués aléatoirement sur une surface de 17 ha. Les couleurs en humide des horizons varient de 5YR 5/3 (brun rougeâtre) à 5YR 3/3 (brun rougeâtre sombre) en surface, puis de 5YR 4/6, (rouge jaunâtre) à 5YR 4/4 (brun rougeâtre) en profondeur. À la différence des sols du site de Las Cardas, on peut noter un assombrissement en profondeur. L'absence de données ne nous permet pas de proposer une explication à cette observation (Figure 4.5). Les densités apparentes varient de 1,67 à 1,85 g·cm⁻³ en surface et augmentent avec la profondeur pour les sept profils. Comme pour les sols du site de Las Cardas, le faible accroissement de la teneur en argile aurait pour effet une diminution de la porosité et par conséquent un accroissement de la densité apparente.

I.2.b. Le secteur sous usage intensif

Trois profils de sol ont été étudiés dans un secteur de 4 ha de surface. Les couleurs des différents horizons varient de 5YR 4/4 (brun rougeâtre) à 5YR 4/6 (rouge jaunâtre) en surface, à 2,5YR 5/4 (brun rougeâtre) en profondeur. Pour cette situation d'usage, on observe des couleurs plus claires en profondeur que dans les sols du secteur préservé (Figure 4.6). La teneur en argile conserve le même comportement en fonction de la profondeur que les deux secteurs analysés au préalable. Les densités apparentes varient de 1,67 à 1,87 g·cm⁻³ en surface et de 1,71 à 1,89 g·cm⁻³ en profondeur. Ces valeurs assez élevées témoignent d'un travail de brassage systématiquement appliqué sur le terrain.

Tableau 4.2. Caractéristiques générales des sols de la zone de Talhuén.

Profil	Profondeur	Couleur				Densité apparente	Proportion d'éléments grossiers	Granulométrie (mm)			Capacité d'échange cationique
		Sec		Humide				<0,002	0,002-0,05	0,05-2	
		cm		g·cm ⁻³							
Sans usage											
1	0 - 60	5YR	4/4	5YR	5/3	1,85	0,01	-	-	-	-
	60 - 100	5YR	5/4	5YR	4/6	1,89	0,02	-	-	-	-
2	0 - 60	5YR	4/3	5YR	4/4	1,74	0,02	-	-	-	-
	60 - 100	5YR	6/6	5YR	6/6	1,71	0,03	-	-	-	-
3	0 - 70	5YR	4/6	5YR	3/3	1,79	0,02	-	-	-	-
	70 - 100	5YR	5/4	5YR	4/4	1,95	0,02	-	-	-	-
4	0 - 85	5YR	3/3	5YR	3/3	1,87	0,01	-	-	-	-
	85 - 100	5YR	5/4	7.5YR	4/6	1,95	0,01	-	-	-	-
6	0 - 40	5YR	4/2	5YR	3/2	1,83	0,03	389,1	306,1	304,2	-
	40 - 100	5YR	6/3	5YR	4/4	1,87	0,05	410,3	185,6	304,1	-
7	0 - 30	5YR	4/3	5YR	4/4	1,67	0,02	-	-	-	-
	30 - 65	5YR	5/3	5YR	5/3	1,77	0,02	-	-	-	-
	65 - 100	5YR	5/4	5YR	4/4	1,93	0,02	-	-	-	-
8	0 - 55	5YR	5/3	5YR	5/3	1,67	0,05	-	-	-	-
	55 - 100	5YR	5/4	5YR	4/6	1,84	0,08	-	-	-	-
Usage intensif (10 U.P.R ×ha-1×année-1)											
9	0 - 40	5YR	3/4	5YR	3/3	1,87	0,01	-	-	-	-
	40 - 100	2,5YR	3/4	2,5YR	5/4	1,60	0,01	-	-	-	-
10	0 - 75	5YR	4/6	5YR	4/6	1,74	0,01	-	-	-	-
	75 - 100	5YR	4/6	5YR	5/6	1,71	0,01	-	-	-	-
11	0 - 45	7,5YR	4/6	5YR	4/4	1,70	0,01	370,8	155	474,2	-
	45 - 100	5YR	4/6	5YR	4/6	1,88	0,01	422,5	208,3	369,2	-

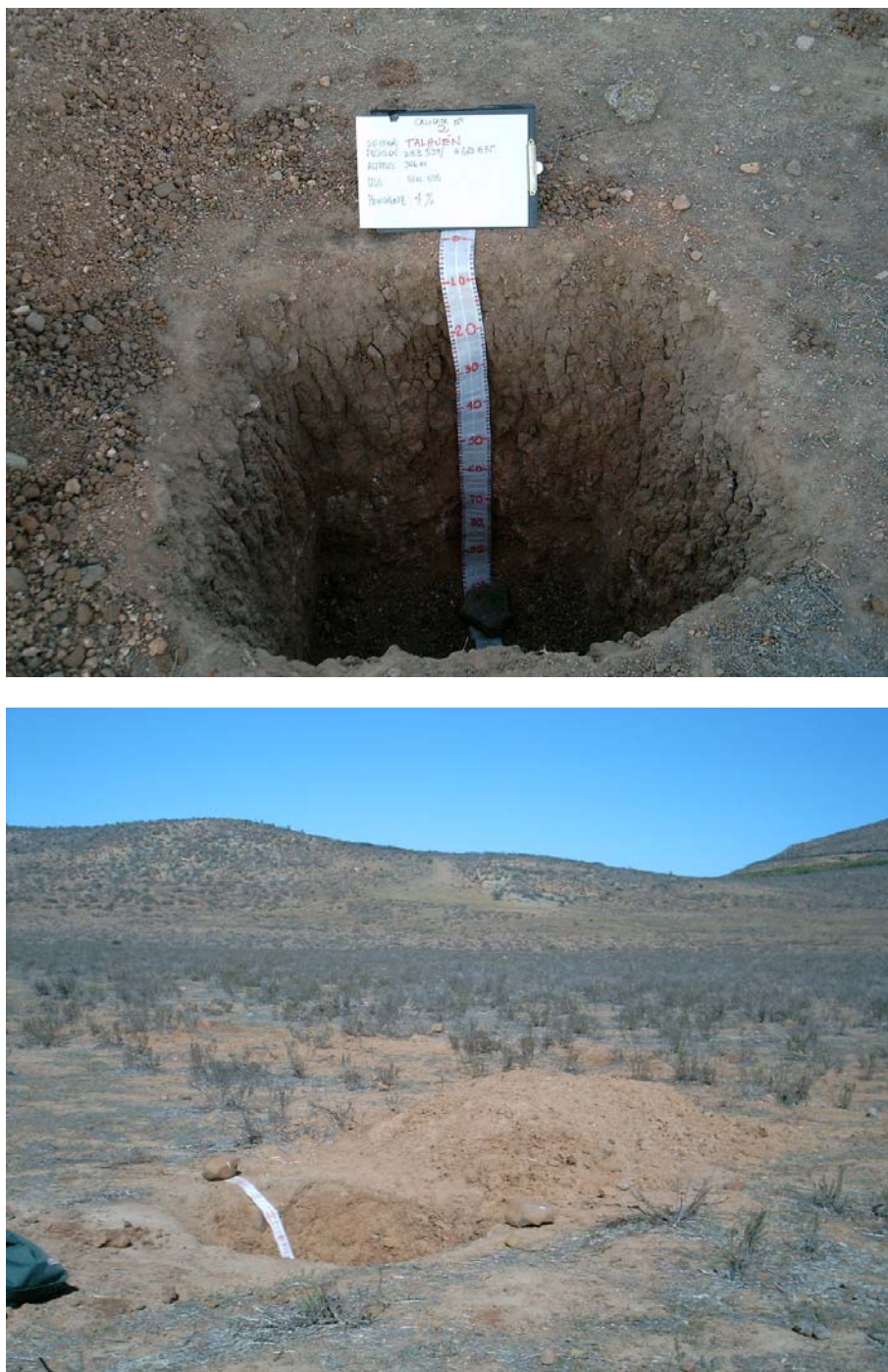


Figure 4.5. Profil et environnement sans usage, secteur de Talhuén, région de Coquimbo, Chili.



Figure 4.6. Profil et environnement secteur sous usage intensif, zone de Talhuén, région de Coquimbo, Chili.

I.3. La zone de Flor del Norte

Un ensemble de six profils a été étudié dans deux secteurs : (i) un secteur sans usage de 6 ha, et (ii) un secteur sous usage intensif (noyers et prairie de luzerne). Les profils

présentent des successions d'horizons similaires quel que soit l'usage. Chaque profil est constitué de 2 à 3 horizons : un horizon de type litière discontinu de 0,5 à 1 cm d'épaisseur pour les sols sans usage, puis un horizon A et un horizon B peu différencié quel que soit l'usage. La couleur varie de 5YR 3/3 (brun foncé rougeâtre) à 7,5YR 4/3 (brun) en surface jusqu'à 7,5 YR 4/6 (brun prononcé) à 1 m de profondeur. Comme pour les sols du site de Talhuén, on note un assombrissement en profondeur qui est sans doute lié à l'accroissement de la teneur en argile.

La proportion d'éléments grossiers augmente avec la profondeur dans l'ensemble des sols. Les résultats des analyses granulométriques montrent une teneur en argile plus élevée en profondeur (tableau 4.3). De telles teneurs sont très proches de ceux observés dans la zone de Talhuén. L'évolution de la densité apparente avec la profondeur est différente de celle enregistrée pour les sols des deux sites précédemment présentés. On observe en effet cette fois une diminution de la densité apparente avec la profondeur. En parallèle à cette variation de la densité apparente, on observe une forte augmentation de la teneur en limon et une diminution de la teneur en sable. Quant à la proportion d'argile, elle augmente légèrement avec la profondeur.

1.3.a. Le secteur sans usage

Deux profils de sols ont été étudiés dans le secteur sans usage d'une surface de 6 ha. Les couleurs en humide varient de 5YR 5/3 (brun rougeâtre) à 5YR 3/3 (brun foncé rougeâtre) en surface, et de 5YR 4/6, (rouge jaunâtre) à 7,5YR 4/6 (brun prononcé) en profondeur. Comme pour le site de Talhuén, on note un assombrissement en profondeur. Les hypothèses qui expliqueraient ce phénomène ont été déjà évoquées dans les paragraphes précédents (Figure 4.7). La densité apparente varie de 1,81 à 1,83 g cm⁻³ en surface, tout en diminuant avec la profondeur et ce sur les deux profils.

I.3.b. Le secteur sous usage intensif

Le secteur sous usage intensif (culture de noyers et prairie de luzerne) a fait l'objet de 4 profils, deux pour chaque type d'usage intensif et distribuées aléatoirement sur chaque surface. Les couleurs des différents horizons varient de 5YR 3/3 (brun foncé rougeâtre) en surface, à 7,5YR 4/4 (brun) en profondeur. Comme pour le cas sans usage, les couleurs présentent un assombrissement en profondeur. Les explications de ce comportement ont été évoquées précédemment (Figure 4.8). La teneur en argiles conserve le même comportement que le secteur sans usage analysé au préalable. La densité apparente varie de 1,77 à 1,86 g·cm⁻³ en surface, et de 1,62 et 1,82 g·cm⁻³ en profondeur.

Tableau 4.3. Caractéristiques générales des sols de la zone de Flor del Norte.

Profil	Profondeur	Couleur		Densité apparente	Proportion d'éléments grossiers	Granulométrie (mm)			Capacité d'échange cationique		
		Sec	Humide			<0,002	0,002-0,05	0,05-2			
	cm			g·cm ⁻³	cm ⁻³ ·cm ⁻³		g·kg ⁻¹		cmol _c ·kg ⁻¹		
Sans usage											
5	0 - 30	7,5YR	3/3	5YR	5/3	1,81	0,07	310,1	198,5	491,4	-
	30 - 100	7,5YR	4/6	7,5YR	4/6	1,76	0,30	386,1	118,3	495,6	-
6	0 - 30	7,5YR	4/3	5YR	3/3	1,83	0,05	-	-	-	-
	30 - 65	5YR	4/4	5YR	4/3	1,72	0,25	-	-	-	-
	65 - 100	5YR	5/6	5YR	4/6	1,61	0,30	-	-	-	-
Usage intensif (culture de noyer et prairie de luzerne)											
1	0 - 30	7,5YR	4/6	5YR	3/3	1,86	0,07	346,5	241	412,5	-
	30 - 45	5YR	4/4	7,5YR	4/6	1,84	0,05	452,9	361,9	185,2	-
	45 - 100	5YR	6/4	5YR	4/4	1,79	0,3	446,8	420,4	132,8	-
2	0 - 30	10YR	4/4	7,5YR	4/3	1,77	0,05	-	-	-	-
	30 - 100	7,5YR	6/6	5YR	4/4	1,79	0,4	-	-	-	-
	100 - 130	7,5YR	4/4	7,5YR	4/4	1,81	0,02	-	-	-	-
3	0 - 70	5YR	4/4	5YR	3/3	1,78	0,03	-	-	-	-
	70 - 100	5YR	4/6	5YR	4/6	1,62	0,02	-	-	-	-
4	0 - 25	5YR	3/3	5YR	3/3	1,78	0,05	-	-	-	-
	25 - 70	7,5YR	4/4	7,5YR	4/4	1,82	0,15	-	-	-	-



Figure 4.7. Profil et environnement, secteur sans usage, zone de Flor del Norte, région de Coquimbo, Chili.



Figure 4.8. Profil et environnement sous usage intensif, zone de Flor del Norte, région de Coquimbo, Chili.

I.4. La zone de Camarico

Un ensemble de 19 profils d'un mètre de profondeur a été étudié sur un secteur à usage intensif (culture de vigne). Tous les profils présentent une distribution d'horizons semblable (horizons A / B / C). Le seul profil analysé montre une augmentation en profondeur de la teneur en argile. La CEC ne varie en revanche que très peu avec la profondeur (tableau 4.4). Comme pour les sols du site de Flor del Norte, la densité apparente décroît avec la profondeur (de $1,60 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ en moyenne pour les horizons de surface jusqu'à $1,40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ en profondeur). La couleur est très variable selon les horizons : 10YR 4/3 (brun), 10YR 3/3 (brun foncé), 10YR 2/1 (noir), 2,5YR 5/4, 5YR 5/3, 5/4 (brun rougeâtre), 5YR 5/6, 4/6 (rouge jaunâtre), 7,5YR 5/6 (brun foncé) et cela de 0 à 100 cm de profondeur. Comme pour les sites de Talhuén et Flor del Norte, on relève un assombrissement en profondeur (Figure 4.9).

Tableau 4.4. Caractéristiques générales des sols de la zone de Camarico.

Profil	Profondeur	Couleur		Densité apparente	Proportion d'éléments grossiers	Granulométrie (mm)			Capacité d'échange cationique
		Sec	Humide			<0,002	0,002-0,05	0,05-2	
		cm				g·cm ⁻³	cm ³ ·cm ⁻³	g·kg ⁻¹	
Usage intensif (vignoble)									
1	0 - 30		10YR 3/3	1,62	0,05	-	-	-	-
	30 - 50		2,5YR 4/4	1,51	0,9	-	-	-	-
	50 - 105		2.5YR 5/4	1,43	0,15	-	-	-	-
2	0 - 40		10YR 2/1	1,58	0,05	-	-	-	-
	40 - 50		5YR 4/2	1,49	0,5	-	-	-	-
	50 - 90		5YR 4/2	1,45	0,05	-	-	-	-
3	0 - 35		10YR 2/1	1,61	0,10	-	-	-	-
	35 - 55		7,5YR 3/3	1,51	0,25	-	-	-	-
	55 - 85		5YR 5/6	1,15	0,25	-	-	-	-
4	0 - 30		10YR 2/1	1,66	0,05	-	-	-	-
	30 - 50		7,5YR 3/3	1,40	0,40	-	-	-	-
	50 - 90		7.5YR 5/6	0,84	0,10	-	-	-	-
5	0 - 10		10YR 2/1	1,43	0,15	-	-	-	-
	10 - 30		10YR 2/1	1,68	0,20	-	-	-	-
	30 - 52		7.5YR 4/3	1,41	0,20	-	-	-	-
	52 - 102		5YR 4/6	1,49	0,10	-	-	-	-
6	0 - 10		10YR 2/1	1,41	0,15	-	-	-	-
	10 - 40		10YR 2/2	1,42	0,15	-	-	-	-
	40 - 50		5YR 5/3	1,36	0,85	-	-	-	-
	50 - 100		2,5YR 4/4	1,19	0,10	-	-	-	-
7	0 - 30		10YR 2/1	1,58	0,15	392	182	426	25,7
	30 - 50		10YR 3/3	1,58	0,15	405	183	412	25,1
	50 - 110		10YR 5/2	1,62	0,10	479	155	366	24,1
8	0 - 30		10YR 2/1	1,65	0,15	-	-	-	-
	30 - 50		5YR 4/4	1,65	0,60	-	-	-	-
	50 - 120		5YR 5/3	1,47	0,10	-	-	-	-
9	0 - 20		10YR 2/1	1,60	0,20	-	-	-	-
	20 - 50		7.5YR 3/2	1,48	0,10	-	-	-	-
	50 - 120		5YR 4/4	1,59	0,10	-	-	-	-
10	0 - 25		10YR 2/1	1,60	0,20	-	-	-	-
	25 - 45		7.5YR 3/2	1,25	0,10	-	-	-	-
	45 - 115		5YR 4/4	1,51	0,10	-	-	-	-
11	0 - 30		10YR 2/1	1,65	0,15	-	-	-	-
	30 - 50		5YR 4/4	1,65	0,60	-	-	-	-
	50 - 120		5YR 5/3	1,47	0,10	-	-	-	-
13	0 - 35		10YR 2/1	1,46	0,15	-	-	-	-
	35 - 55		5YR 4/4	1,29	0,80	-	-	-	-
	55 - 125		5YR 4/4	1,17	0,05	-	-	-	-
14	0 - 30		10YR 2/1	1,59	0,15	-	-	-	-
	30 - 60		5YR 4/4	1,65	0,90	-	-	-	-
	60 - 95		5YR 5/3	1,37	0,10	-	-	-	-
15	0 - 30		10YR 2/1	1,64	0,05	-	-	-	-
	30 - 50		5YR 4/4	1,36	0,10	-	-	-	-
	50 - 120		5YR 5/3	1,55	0,05	-	-	-	-

Tableau 4.4. Caractéristiques générales des sols de la zone de Camarico (suite).

Profil	Profondeur	Couleur		Densité apparente	Proportion d'éléments grossiers	Granulométrie (mm)			Capacité d'échange cationique
		Sec	Humide			<0,002	0,002-0,05	0,05-2	
		cm				g·cm ⁻³	cm ⁻³ ·cm ⁻³	g·kg ⁻¹	
Usage intensif (vignoble)									
16	0 - 30		10YR 2/1	1,70	0,15	-	-	-	-
	30 - 55		5YR 4/4	1,57	0,85	-	-	-	-
	55 - 115		5YR 4/4	1,47	0,10	-	-	-	-
17	0 - 30		10YR 2/1	1,66	0,15	-	-	-	-
	30 - 55		7.5YR 4/4	1,48	0,70	-	-	-	-
	55 - 95		5YR 4/4	1,44	0,15	-	-	-	-
18	0 - 30		10YR 2/1	1,72	0,15	-	-	-	-
	30 - 60		7.5YR 4/4	1,59	0,70	-	-	-	-
	60 - 100		5YR 4/4	1,48	0,15	-	-	-	-
19	0 - 30		10YR 4/3	1,74	0,20	-	-	-	-
	30 - 50		5YR 4/4	1,55	0,60	-	-	-	-
	50 - 90		5YR 4/4	1,60	0,05	-	-	-	-
20	0 - 30		10YR 2/1	1,58	0,15	-	-	-	-
	30 - 50		5YR 4/4	1,47	0,10	-	-	-	-
	50 - 110		5YR 4/4	1,56	0,05	-	-	-	-



Figure 4.9. Profil et son environnement secteur sous usage intensif, zone de Camarico, région de Coquimbo, Chili.

I.5. Zone d'El Palqui

La description a été faite sur 20 profils d'un mètre de profondeur creusés sur un secteur à usage intensif (vignoble). On remarque que pour l'ensemble des profils, le matériau parental est beaucoup moins profond que pour les sols des autres sites (50 cm en moyenne) et cela sans doute en raison de la pente importante (Figure 4.10). Les sols sont développés sur des matériaux ignés (andésites et basaltes) altérés (Álvarez, 2005). Tous les profils de sols sont composés d'un horizon A et d'un horizon B ou BC. La couleur varie de 2,5YR 3/3 3/4 (brun foncé rougeâtre) à 5YR 4/6 (rouge jaunâtre) en surface, et de 2,5YR 3/2 (rouge sombre) à 5YR4/6 (rouge jaunâtre) en profondeur (Figure 4.10).

Le profil analysé ne montre pas de variation de composition granulométrique, de CEC sur les premiers quarante centimètres (tableau 4.5). La densité apparente ne montre pas non plus de variation sur l'ensemble du profil.

Tableau 4.5. Caractéristiques générales des sols de la zone d'El Palqui.

Profil	Profondeur	Couleur		Densité apparente	Proportion d'éléments grossiers	Granulométrie (mm)			Capacité d'échange cationique
		Sec	Humide			<0,002	0,002-0,05	0,05-2	
		cm				g·cm ⁻³	cm ³ ·cm ⁻³	g·kg ⁻¹	
Usage intensif (vignoble)									
1	0 - 20	5YR	4/4	1,78	0,2	-	-	-	-
	20 - 45	5YR	4/6	1,72	0,15	-	-	-	-
	45 - 75	5YR	4/6	1,66	0,1	-	-	-	-
2	0 - 25	5YR	3/3	1,82	0,05	-	-	-	-
	25 - 75	5YR	4/4	1,83	0,05	-	-	-	-
	75 - 95	5YR	4/6	1,89	0,05	-	-	-	-
3	0 - 20	5YR	3/3	1,80	0,20	-	-	-	-
	20 - 45	5YR	4/4	1,88	0,10	-	-	-	-
4	0 - 20	5YR	3/3	1,86	0,25	-	-	-	-
	20 - 35	5YR	3/4	1,88	0,20	-	-	-	-
5	0 - 25	5YR	3/3	1,70	0,15	-	-	-	-
6	0 - 30	5YR	3/4	1,76	0,05	-	-	-	-
7	0 - 10	5YR	3/3	1,78	0,15	-	-	-	-
	10 - 20	5YR	3/4	1,93	0,40	-	-	-	-
8	0 - 20	5YR	3/3	1,74	0,15	-	-	-	-
	20 - 55	5YR	3/4	1,72	0,10	-	-	-	-
9	0 - 20	2,5YR	3/3	1,82	0,20	-	-	-	-
	20 - 40	2,5YR	3/4	1,88	0,10	-	-	-	-
10	0 - 20	2,5YR	3/3	2,07	0,10	-	-	-	-
	20 - 65	2,5YR	3/4	1,83	0,50	-	-	-	-
11	0 - 20	2,5YR	3/3	1,81	0,20	-	-	-	-
	20 - 60	2,5YR	3/4	1,81	0,30	-	-	-	-
12	0 - 25	2,5YR	3/3	1,83	0,10	-	-	-	-
13	0 - 20	2,5YR	3/2	1,73	0,15	-	-	-	-
	20 - 40	2,5YR	3/4	1,80	0,10	-	-	-	-
14	0 - 20	2,5YR	3/2	1,84	0,20	386	288	326	33,1
	20 - 40	2,5YR	3/3	1,81	0,20	386	248	366	34,7
	40 - 75	2,5YR	4/6	1,80	0,70	188	196	616	23,9
15	0 - 20	2,5YR	3/3	1,86	0,15	-	-	-	-
	20 - 40	2,5YR	3/4	1,95	0,10	-	-	-	-
16	0 - 40	2,5YR	3/3	1,83	0,30	-	-	-	-
17	0 - 25	2,5YR	3/3	1,78	0,10	-	-	-	-
	25 - 70	2,5YR	3/4	1,87	0,20	-	-	-	-
18	0 - 40	2,5YR	3/2	1,76	0,25	-	-	-	-
	40 - 60	2,5YR	3/3	1,79	0,10	-	-	-	-
	60 - 100	2,5YR	3/3	1,86	0,05	-	-	-	-
19	0 - 25	2,5YR	3/3	1,80	0,15	-	-	-	-
	25 - 45	2,5YR	3/4	1,82	0,20	-	-	-	-
20	0 - 25	2,5YR	3/3	1,81	0,10	-	-	-	-
	25 - 55	2,5YR	3/4	1,82	0,10	-	-	-	-



Figure 4.10. Paysage secteur sous usage intensif, zone d’El Palqui, région de Coquimbo, Chili.

I.6. Zone de San Pedro de Pichasca

Des sols ont été étudiés sous trois types d'usage : (i) dans un secteur protégé de 16 ha, (ii) dans un secteur sous usage extensif (ancienne prairie de luzerne) de 2 ha et (iii) dans un secteur sous usage intensif (vigne) de 2 ha. Tous ces profils sont localisés sur des pentes importantes. Les profils présentent des successions d'horizons différentes sans qu'il puisse être établi une relation entre le type de succession observé et l'usage du sol. Ils sont soit constitués d'un horizon A et d'un horizon C, soit par la succession A, B et C, l'horizon B ayant une épaisseur très variable. Les profils analysés montrent une augmentation de la teneur en argile en profondeur, indiquant par la même la présence possible d'un processus d'illuviation. La CEC augmente elle aussi en profondeur, sans doute en raison de l'augmentation de la teneur en argile (tableau 4.6). La densité apparente mesurée sur échantillon de taille centimétrique varie de 1,80 à 1,95 g·cm⁻³ sans relation nette avec la profondeur ou l'usage du sol.

I.6.a. Le secteur sans usage

Quatre profils de sols ont été étudiés dans ce secteur de 16 ha. Les couleurs en humide sont assez homogènes et varient de 2,5YR 4/2 (rouge sombre) à 5YR 4/4 (brun rougeâtre), de 2,5YR 3/3 (brun sombre rougeâtre) à 5YR 3/4 (brun sombre rougeâtre). On note un léger assombrissement en profondeur (Figure 4.11). La densité apparente ne montre pas de variation nette avec la profondeur. On relève cependant une légère tendance à l'augmentation avec la profondeur avec des valeurs 1,75 à 1,87 g·cm⁻³ en surface, et d'autres de 1,78 à 1,95 g·cm⁻³ en profondeur. La proportion d'éléments grossiers augmente en profondeur.

I.6.b. Le secteur sous usage extensif

Deux profils ont été étudiés dans ce secteur. Les couleurs ne varient pas avec la profondeur, elles restent constante tout au long du profil pour l'ensemble des profils (7,5YR 3/4, brun foncé) (Figure 4.12). Il n'est pas possible de conclure quant aux variations de la densité apparente, de la composition granulométrique et de la teneur en éléments grossiers. En effet, seuls deux profils ont été étudiés et l'un d'eux n'est composé que d'un seul horizon.

I.6.c. Le secteur sous usage intensif

Deux profils ont été étudiés dans ce secteur. La couleur est comme précédemment peu variable en surface (5YR 3/3, brun sombre rougeâtre à 7,5YR 3/4, brun sombre). A noter un léger éclaircissement en profondeur (7,5YR 4/3 à 4/4, brun sombre) (Figure 4.13). La densité apparente varie mais sans relation apparente avec la profondeur. A noter ici aussi une augmentation de la teneur en argile en profondeur.

Tableau 4.6. Caractéristiques générales des sols de la zone de San Pedro de Pichasca.

Profil	Profondeur	Couleur		Densité apparente	Proportion d'éléments grossiers	Granulométrie (mm)			Capacité d'échange cationique		
		Sec	Humide			<0,002	0,002-0,05	0,05-2			
	cm				g·cm ⁻³	cm ³ ·cm ⁻³		g·kg ⁻¹	cmol·kg ⁻¹		
Sans usage											
5	0 - 55	2,5YR	4/3	2,5YR	3/2	1,80	0,01	249,2	360,9	389,9	-
	55 - 100	2,5YR	3/3	2,5YR	3/3	1,95	0,03	288,8	235,6	475,7	-
6	0 - 45	2,5YR	4/3	5YR	3/3	1,75	0,01	-	-	-	-
	45 - 100	5YR	5/3	5YR	3/3	1,88	0,03	-	-	-	-
7	0 - 35	2,5YR	4/3	5YR	4/3	1,87	0,03	-	-	-	-
	35 - 100	5YR	5/3	5YR	3/3	1,87	0,15	-	-	-	-
8	0 - 40	2,5YR	4/3	5YR	4/4	1,83	0,03	-	-	-	-
	40 - 100	5YR	5/3	5YR	3/4	1,78	0,07	-	-	-	-
Usage extensif (6 S.R.U ×ha ⁻¹ ×année ⁻¹)											
3	0 - 40	7,5YR	4/3	7,5YR	3/4	1,88	0,2	-	-	-	-
4	0 - 45	7,5YR	4/3	7,5YR	3/4	1,69	0,07	103,3	396,9	499,8	-
	45 - 100	7,5YR	4/4	7,5YR	3/4	1,60	0,03	167,2	277,9	554,9	-
Usage intensif (10 S.R.U ×ha ⁻¹ ×année ⁻¹)											
1	0 - 25	5YR	4/3	5YR	3/3	1,75	0,1	-	-	-	-
	25 - 70	5YR	4/3	5YR	4/3	1,93	0,08	-	-	-	-
	70 - 100	7,5YR	4/3	7,5YR	4/3	1,78	0,07	-	-	-	-
2	0 - 55	5YR	5/3	7,5YR	3/4	1,80	0,05	249,2	345,1	405,7	-
	55 - 70	7,5YR	4/3	7,5YR	4/3	1,50	0,02	322,2	184,5	493,3	-
	70 - 100	7,5YR	3/4	7,5YR	4/4	1,68	0,00	334,3	73,0	592,7	-



Figure 4.11. Profil et environnement secteur sans usage, zone de San Pedro de Pichasca, région de Coquimbo, Chili.



Figure 4.12. Profil et environnement secteur sous usage extensif, zone de San Pedro de Pichasca, région de Coquimbo, Chili.



Figure 4.13. Profil et environnement secteur sous usage intensif, zone de San Pedro de Pichasca, région de Coquimbo, Chili.

I.7. Zone de Las Ramadas

Des profils ont été étudiés dans trois secteurs correspondant à trois types d'usage : (i) un secteur sans usage de 5,2 ha, (ii) un secteur de 4 ha sous usage extensif (plantation de 9 mois de noyers) et (iii) un secteur de 8 ha sous usage intensif (noyers de 8 ans). Les développements varient en fonction de la localisation des profils. Ceux développés dans les secteurs sous plantation de noyer le sont sur des terrasses alluviales étroites (profils A / B / C) alors que ceux du secteur sans usage le sont des versants très pentus (profils A / C). A la différence des sols de les sites Las Cardas et Talhuén, et de façon analogue à ce qui a été observé dans les sites de Flor del Norte, Camarico et El Palqui, la densité apparente montre une tendance à l'augmentation avec la profondeur, la densité apparente de l'horizon de surface étant inférieure à celle observée dans les horizons sous jacents. La teneur en argile diminue avec la profondeur dans tous les profils et elle se corrèle parfaitement avec la décroissance des CEC (Figure 4.14). Les couleurs sont relativement proches entre les horizons de surface et en profondeur, avec une légère tendance à l'assombrissement en profondeur.

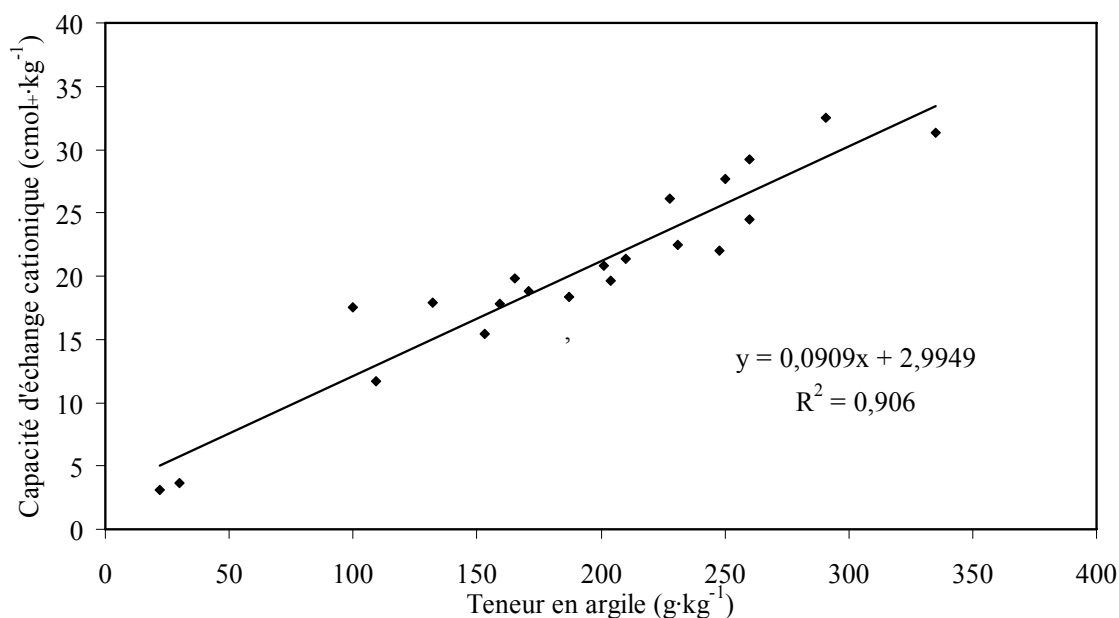


Figure 4.14. Relation entre la teneur en argile et la capacité d'échange cationique de Las Ramadas.

I.7.a. Le secteur sans usage

Deux profils ont été étudiés dans ce secteur de 5 ha. Les couleurs en humide varient de 10YR 4/3 (brun), à 10YR 5/6 (brun jaunâtre), à 10YR 4/2 (brun sombre grisâtre), ou encore 10YR 4/4 (brun sombre jaunâtre) (Figure 4.15). La densité apparente ne montre pas de variation claire avec la profondeur dans les deux profils étudiés. La teneur en argile et la CEC diminuent avec la profondeur.

I.7.b. Le secteur sous usage extensif

Deux profils ont été étudiés dans ce secteur de 4 ha. Les couleurs en humide des différents horizons sont peu variables : 10YR 3/4 (brun sombre jaunâtre) à 10YR 4/3 (brun) en surface et 10YR 4/6 à 4/4 (brun sombre jaunâtre) (Figure 4.16) en profondeur. La densité apparente tend à augmenter avec la profondeur (de 1,33 - 1,52 g·cm⁻³ en surface à 1,79 - 1,8 g·cm⁻³ en profondeur). De la même façon que pour le secteur préservé, la CEC et la teneur en argile diminuent avec la profondeur.

I.7.c. Le secteur sous usage intensif

Quatre profils ont été étudiés dans ce secteur de 8 ha. Les couleurs en humide sont proches entre les horizons des différents profils. La couleur varie en effet de 10YR 4/3 (brun) à 10YR 4/2 (brun sombre grisâtre) en surface, et de 10YR 5/4 (brun jaunâtre) à 10YR 3/2 (brun grisâtre très sombre) en profondeur (Figure 4.17). La densité apparente varie de 1,34 à 1,56 g·cm⁻³ entre 0 et 100 cm de profondeur. La teneur en argile et la CEC diminuent en revanche avec la profondeur.

Tableau 4.7. Caractéristiques générales des sols de la zone de Las Ramadas.

Profil	Profondeur	Couleur		Densité apparente	Proportion d'éléments grossiers	Granulométrie (mm)			Capacité d'échange cationique
		Sec	Humide			<0,002	0,002-0,05	0,05-2	
	cm			g·cm ⁻³	cm ⁻³ ·cm ⁻³		g·kg ⁻¹		cmol _c ·kg ⁻¹
Sans usage									
5	0 - 45	10YR 4/2	10YR 4/3	1,10	0,15	171	355	474	18,8
	45 - 100	10YR 5/6	10YR 4/4	1,88	0,30	100	367	533	17,5
6	0 - 50	10YR 7/6	10YR 5/6	1,83	0,10	165	373	462	19,8
	50 - 100	10YR 5/2	10YR 4/2	1,27	0,25	132	345	523	17,9
Usage extensif									
7	0 - 70	10YR 5/6	10YR 3/4	1,52	0,02	250	380	370	27,7
	70 - 100	10YR5/6	10YR4/6	1,80	0,03	260	339	401	24,5
8	0 - 45	10YR 5/4	10YR 4/3	1,33	0,07	187	325	488	18,4
	45 - 85	10YR 5/6	10YR 4/4	1,79	0,25	159	306	535	17,8
Usage intensif (noyer)									
1	0 - 6	10YR 6/2	10YR 4/3	1,56	0,07	153	206	641	15,4
	6 - 25	10YR 6/2	10YR 4/2	1,61	0,07	109	157	734	11,7
	25 - 60	10YR 7/2	10YR 6/2	1,74	0,10	22	20	958	3,15
	60 - 100	10YR 6/2	10YR 4/1	1,35	0,15	30	34	936	3,67
2	0 - 4	10YR 6/2	10YR 4/2	1,54	0,05	291	474	235	32,5
	4 - 60	10YR 6/2	10YR 4/2	1,62	0,05	231	354	415	22,5
	60 - 100	10YR 4/2	10YR 3/1	1,71	0,10	201	254	545	20,8
3	0 - 4	10YR 5/2	10YR 4/3	1,34	0,01	335	393	272	31,3
	4 - 65	10YR 6/3	10YR 4/3	1,66	0,03	248	340	412	22
	65 - 100	10YR 6/4	10YR 4/2	1,64	0,10	204	293	503	19,6
4	0 - 20	10YR 5/3	10YR 3/2	1,36	0,10	260	357	383	29,2
	20 - 70	10YR 7/2	10YR 5/4	1,55	0,15	228	354	418	26,1
	70 - 100	10YR 8/6	10YR 5/4	1,68	0,40	210	371	419	21,4



Figure 4.15. Profil et environnement secteur sans usage, zone de Las Ramadas, région de Coquimbo, Chili.



Figure 4.16. Profil et environnement secteur sous usage extensif, zone de La Ramadas, région de Coquimbo, Chili.



Figure 4.17. Profil et environnement secteur sous usage intensif, zone de Las Ramadas, région de Coquimbo, Chili.

II. Conclusions

Globalement il n'existe pas d'influence du type d'usage sur la distribution d'horizons, la composition granulométrique, les densités apparentes et les CEC.

On apprécie, tout au long du transect, une augmentation des teneurs en argiles et d'éléments grossiers avec la profondeur.

Les CEC sont fortement corrélées avec les teneurs en argiles.

En profondeur, on observe un assombrissement des couleurs tout au long du transect.

CHAPITRE V

ANALYSE QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA
MATIERE ORGANIQUE DES SOLS

Dans ce chapitre différents résultats d'analyses seront présentés ainsi que les résultats des calculs de stocks de carbone organique total. Pour ce dernier point voici la méthode utilisé :

Le Stock de Carbone Organique Total (SCOT, $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pour toute condition d'usage a été calculé par couche d'échantillonnage : par couche de 5 cm pour les 10 premiers cm, ensuite le calcul se poursuit tous les 10 cm jusqu'à 1 m de profondeur selon la fonction suivante :

$$SCOT = 100 \times E_i \times COT_i \times D_{ai} \times EG_i \text{ où :}$$

E_i = épaisseur de la couche

COT_i = carbone organique total en $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

D_{ai} = densité apparente de la couche en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

EG_i = proportion en éléments grossiers ($> 2 \text{ mm}$)

Pour la totalité du profil, nous avons déterminé le $SCOT_s$ (stock du profil du sol) au moyen de l'équation suivante :

$$SCOT_s = 100 \times \sum_n (E_i \times COT_i \times D_{ai} \times EG_i)$$

I. Analyse quantitative et qualitative de la matière organique des sols de Las Cardas et impact de différents usages des terres

I.1. Généralités

Pour mémoire, Las Cardas se situe à 45 km de la ville d'Ovalle province d'Elqui, région de Coquimbo ($71^{\circ}15'32''\text{S}$; $30^{\circ}13'59''\text{W}$).

L'échantillonnage de cette zone d'étude a été réalisé dans trois secteurs soumis à des modes d'usage différents, à savoir un secteur mis en réserve depuis 1973 (56,7 % de couverture végétale), deux secteurs de pâturage : un avec un usage extensif (6 unités UPR $\times \text{ha}^{-1} \times \text{année}^{-1}$), et l'autre sous usage intensif (10 UPR $\times \text{ha}^{-1} \times \text{année}^{-1}$).

La discussion des résultats de cette zone, ainsi que toutes les autres (Talhuén, Flor del Norte, Camarico, El Palqui, San Pedro de Pichasca et Las Ramadas), porte sur des profils moyens, c'est à dire les valeurs analysées correspondent à la moyenne arithmétique de la variable étudiée par secteur d'usage.

I.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone de Las Cardas et évolution dans les profils

Les sols des trois secteurs se caractérisent par de faibles teneurs en Carbone Organique Total (COT) (tableau 5.1). En effet, ces teneurs varient de 0,75 et 8,6 g·kg⁻¹ pour le secteur préservé, de 0,17 à 9,27 g·kg⁻¹ pour le mode d'usage extensif et de 0,3 à 7,26 g·kg⁻¹ pour le mode d'usage intensif. En fait, pour ces trois secteurs, partant de valeurs comprises entre 6 et 9 g·kg⁻¹ dans la couche superficielle du sol, les teneurs de COT chutent rapidement à 1 à 3 g·kg⁻¹ à 10 ou 20 cm de profondeur. La baisse du COT se poursuit encore vers la base des profils, mais beaucoup plus progressivement.

Tableau 5.1. Données quantitatives (COT, stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) des trois secteurs sous trois modes d'usage différents à Las Cardas.

Profondeur (cm)	COT (g×kg ⁻¹)	Stock de C (Mg×ha ⁻¹)	S ₂ (mg HC×g ⁻¹ sol)	IH (mg HC×g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ ×g ⁻¹ COT)
Secteur sans usage					
0 - 5	8,60	8,95	1,46	166	285
5 - 10	6,27	5,24	0,89	145	322
10 - 20	3,05	5,11	0,30	97	493
20 - 30	2,27	3,72	0,19	90	705
30 - 40	2,19	3,65	0,19	83	615
40 - 50	1,37	2,19	0,14	85	725
50 - 60	0,93	1,57	0,07	73	1003
60 - 70	0,82	1,44	0,06	78	1009
70 - 80	0,88	1,60	0,07	78	1099
80 - 90	1,11	2,07	0,09	103	720
90 - 100	0,75	1,56	0,07	124	865
Secteur à usage extensif (6 unités petits ruminants×ha⁻¹×année⁻¹)					
0 - 5	9,27	6,84	1,76	184	249
5 - 10	4,66	4,07	0,61	131	407
10 - 20	1,77	3,11	0,15	88	707
20 - 30	1,40	2,46	0,09	66	757
30 - 40	1,10	1,73	0,07	65	1025
40 - 50	1,52	2,46	0,11	73	764
50 - 60	1,37	1,97	0,11	72	834
60 - 70	1,33	1,98	0,09	66	895
70 - 80	0,85	1,37	0,05	64	1132
80 - 90	0,42	0,87	0,03	81	1356
90 - 100	0,17	0,35	0,01	89	2169
Secteur à usage intensif (10 unités petits ruminants×ha⁻¹×année⁻¹)					
0 - 5	6,96	5,88	1,09	151	245
5 - 10	1,36	0,95	0,19	140	736
10 - 20	0,95	1,49	0,13	156	891
20 - 30	0,76	0,99	0,06	89	1151
30 - 40	0,59	0,67	0,06	103	1468
40 - 50	0,43	0,60	0,05	121	1804
50 - 60	0,44	0,63	0,06	169	1727
60 - 70	0,41	0,66	0,06	149	1358
70 - 80	0,30	0,48	0,05	160	1814
80 - 90	0,35	0,49	0,05	145	1235
90 - 100	0,51	0,63	0,07	144	1385

Ce type de profil est tout à fait général, voire banal et se rencontre dans de très nombreux types de sols, dans des écosystèmes divers (Duchaufour, 1977). Globalement, il

exprime un apport essentiel de matière organique aux sols via les parties aériennes des végétaux, puis la dégradation progressive de ce matériel à proximité de la surface. En profondeur, les faibles valeurs de COT témoignent à la fois de faibles apports organiques *in situ* par le système racinaire (matériel organique et exsudats), ainsi que d'un très mauvais transfert de MO de la surface des profils vers la profondeur. A son tour tout ceci témoigne a priori d'un très mauvais brassage du sol, la percolation de constituants solubles voire en suspension dans l'eau semblant ici pouvoir être exclue en raison de la faiblesse de la pluviosité et de l'absence d'irrigation.

I.3. Qualité de la matière organique

Les données qualitatives sur la MO proviennent essentiellement de la pyrolyse Rock-Eval. Il s'agit essentiellement des index d'Hydrogène IH et d'oxygène IO qui renseignent respectivement sur la richesse en hydrogène et en oxygène de la MO. A ceux-ci s'ajoutent d'autres paramètres (S_2 , R400) fournis par cette même technique et sur lesquels nous reviendrons ci-après, ainsi que des paramètres indépendants tels que le classique C/N.

Nous n'avons pas de données d'analyse de végétaux sources de la MO des sols de la région d'étude qui pourraient nous servir de référence. D'ailleurs, d'une manière générale, il n'existe que très peu de données de pyrolyse Rock-Eval sur des végétaux (surtout sur des plantes herbacées) et même sur de la litière pédologique. Les données fournies par Disnar *et al.*, (2003) sur des litières de savanes africaines révèlent des valeurs de IH voisines ou supérieures à 400 mg de HC $\times$ g⁻¹ de COT. Ainsi un IH de 406 mg de HC $\times$ g⁻¹ de COT a été déterminé pour un horizon O_l-O_f d'une savane du Cameroun. Des valeurs plus élevées peuvent être atteintes dans des litières forestières, par exemple un IH de 650 mg de HC $\times$ g⁻¹ de COT a été trouvé pour une litière forestière, sous chêne et houx. Récemment, des valeurs de IH de 370 et 510 mg de HC $\times$ g⁻¹ de COT ont respectivement été déterminées pour des litières de Cerrado (savane arborée) et une litière de pâturage de graminée *Brachiaria brizantha* (Hochst. Stapf.), du Brésil (Volland-Tuduri, 2005). Si l'on se réfère à ces données antérieures, les IH des sols de Las Cardas qui sont en général très bas dès le sommet des profils (< 200 mg de HC $\times$ g⁻¹ de COT), et révèlent une MO déjà très dégradée. Cette dégradation semble encore s'accroître plus en profondeur où les valeurs d'IH sont généralement encore plus basses, sauf curieusement, dans les niveaux les plus profonds de la

zone sous usage intensif (tableau 5.1). D'une manière générale, la diminution des IH qui est observée en profondeur peut être due : (i) à l'altération de la MO, mais éventuellement aussi (ii) à la présence de carbone réfractaire (« black carbon » ; Copard *et al.*, 2002), soit encore (iii) à un effet de matrice minérale (Espitalié *et al.*, 1986), ces possibilités ne s'excluant pas mutuellement. L'effet de matrice minérale est une rétention des produits de pyrolyse par certains minéraux (essentiellement argileux, illite surtout) qui a pour conséquence d'abaisser les valeurs de IH, sans affecter le COT. L'intensité de cet effet, et donc la baisse de l'IH qu'il entraîne est a priori d'autant plus importante que l'échantillon analysé est pauvre en COT. Afin de tenter de discerner la part de l'un et l'autre des facteurs incriminés, on peut tenter de s'appuyer sur des diagrammes S_2 vs COT, sachant que S_2 est la quantité de constituants hydrocarbonés émis durant la pyrolyse et que le IH est défini comme le S_2 rapporté au COT (Espitalié *et al.*, 1985a).

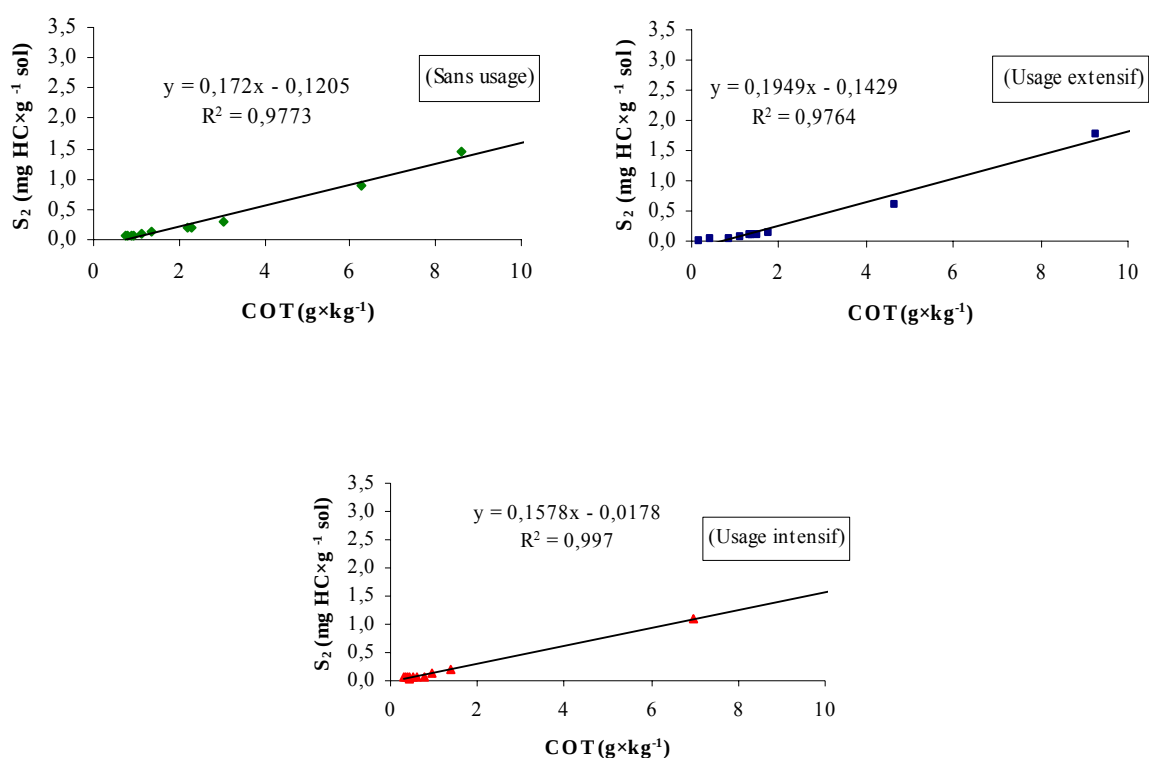


Figure 5.1. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de Las Cardas.

Ainsi, pour les trois secteurs (Figure 5.1), on note que les droites définies par l'alignement des points de données intercepte l'axe des abscisses pour des valeurs de COT qui diminuent avec l'intensité de leur exploitation, seul le secteur protégé produisant une valeur

significative (ca. $0,7 \text{ g} \times \text{kg}^{-1}$; Figure 5.1). De manière immédiate, ceci semble exprimer un mélange d'un fond constant de MO dépourvue d'IH avec des proportions variables de MO ayant un IH constant défini par la pente de la droite (nous reviendrons plus loin sur ce dernier point). Parmi les trois hypothèses mentionnées ci-dessus, cette interprétation paraît de prime abord justifier celle du carbone organique réfractaire. Cependant, il faut alors admettre que ce fond serait d'autant plus faible que l'exploitation du sol est importante, la teneur de carbone réfractaire étant même nulle pour le secteur d'usage intensif dont les points de données s'alignent vers l'origine des axes, dans le diagramme S_2 vs COT (Figure 5.1). De même, dans l'hypothèse d'un effet de matrice minérale, il faudrait que celui-ci soit beaucoup plus marqué dans le secteur protégé que dans celui sous usage intensif, et inexistant dans celui d'usage intensif. Ceci ne s'accorde pas avec la distribution des argiles (cf. Chapitre VI) et va à l'inverse des teneurs en COT qui décroissent avec l'intensité de l'exploitation des sols. Par élimination seule subsiste donc l'hypothèse d'une altération de la MO un peu plus accentuée dans la profondeur des profils que dans leur partie superficielle et que dénotent de plus faible IH. Cette interprétation se heurte cependant aux valeurs d'IH relativement élevées trouvées dans plusieurs niveaux en profondeur dans le profil du secteur exploité de manière intensive. Nous reviendrons ultérieurement sur ce dernier point, cependant il convient immédiatement de rappeler les très faibles valeurs de COT du sol de ce secteur, ce qui rend les valeurs d'IH sujette à caution.

Si l'on considère cette fois la pente de la droite de corrélation S_2 vs COT ($\delta S_2 \cdot \delta \text{COT}^{-1}$) celle-ci fournit une valeur moyenne de IH hors altération poussée ou toute autre perturbation (e.g. par effet de matrice minérale ou présence de C réfractaire). Ces valeurs sont égales à 170, 190 et 150 ($\text{mg HC} \cdot \text{g}^{-1}$ de COT), respectivement pour les secteurs préservé, avec usage extensif et avec usage intensif. Ces valeurs d'IH optimales (nécessairement voisines de celles des niveaux superficiels), qui demeurent faibles et voisines les unes des autres pour les trois secteurs d'étude, et soulignent le caractère très peu discriminant de critères de qualité de la MO tels que l'IH pour distinguer les sols de la zone d'étude selon leurs différents usages. *A contrario*, ceci confère un poids supplémentaire au simple carbone organique et à ses variations dans les profils de sols et entre secteurs d'étude.

Si nous ne disposons que de très peu de valeurs d'IH sur les végétaux, voire sur les litières végétales, en revanche nous avons énormément de données en ce qui concerne le rapport C/N (Corg/Ntot) qui est un indice du degré de décomposition de la matière organique, couramment utilisé en pédologie (Duchaufour, 1977 ; Andreux, *et al.*, 1986, Lozet et

Mathieu, 2002 ; Chesworth, 2008). Lozet et Mathieu (2002) donne une valeur générale de C/N de 50 pour la végétation ce qui semble être confirmé par divers autres travaux. Ainsi Comont *et al.*, (2006) donnent des valeurs du ratio C/N comprises entre 38 et 51,5 pour les premiers 5 cm de profondeur de tourbières du Jura, avec des valeurs variant entre 34–39 à 50 cm de profondeur. Peralta (1986) a déterminé des valeurs de C/N allant de 22,9 en surface à 4,5 à 1 m de profondeur dans des sols dérivés de sédiments marins de la région de Coquimbo (Tongoy medio). Dans le tableau 5.2 est présentée l'évolution avec la profondeur des valeurs du rapport C/N de sols hydromorphes d'une zone côtière et de la cordillère du Chili sous végétation de *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser (d'après Donoso, 1992).

Tableau 5.2. Rapport C/N pour deux zones hydromorphes chiliennes sur la Cordillère des Andes et sur la Cordillère de la Côte (Donoso, 1992).

Horizon	C/N Zone Coronel-Maule (C. de la Côte)	C/N Secteur Bullileo (C. des Andes)
1	21,7	22,2
2	21,5	20,0
3	20,7	14,2

Bien que provenant d'écosystèmes souvent assez éloignés de ceux qui font l'objet de cette étude, ces valeurs fournissent néanmoins des valeurs du rapport C/N typiques de végétaux et de sols dans lesquels la MO est a priori bien préservée (histosols et sols hydromorphes) et qui ont donc de ce fait, valeur de référence. La forte décroissance des rapports C/N alors couramment observée entre végétal et sol (i.e. de ca. 50 à 20-25), s'expliquant simplement par la minéralisation des constituants biologiques les plus labiles, mais aussi des plus abondants tels que les polysaccharides : cellulose et hémicellulose.

Les variations des valeurs du paramètre C/N avec la profondeur dans les trois secteurs étudiés sont présentées dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3. Rapport C/N par type d'usage, zone de Las Cardas.

Profondeur (cm)	C/N Sans usage	C/N Usage extensif	C/N Usage intensif
0 - 5	9,98	9,59	11,79
5 - 10	12,57	9,42	4,73
10 - 20	12,62	8,76	5,88
20 - 30	10,25	10,86	8,51
30 - 40	11,22	9,82	9,83
40 - 50	13,17	13,23	13,60
50 - 60	14,73	12,52	4,47
60 - 70	123,52	47,89	10,01
70 - 80	16,77	18,00	10,39
80 - 90	24,74	9,87	6,47
90 - 100	158,52	11,03	4,16

Des valeurs très élevées (50 à plus de 150) sont observées en profondeur dans les secteurs non exploité et d'élevage extensif. De telles valeurs, plus élevées que celles fournies par de la MO végétale fraîche dénotent très certainement un problème analytique. Une perturbation du dosage du carbone par la présence de faibles proportions de carbonates étant *a priori* exclue puisque les données d'analyse du carbone utilisées sont celles du Rock-Eval et non celles du Leco¹ (qui ne fournit que des données de carbone total), l'incertitude majeure semble plutôt imputable à l'azote qui n'est effectivement présent qu'à des teneurs très faibles et donc vraisemblablement affectées d'une forte incertitude. Le profil du secteur sous usage intensif qui ne présente pas de telles anomalies de C/N montre néanmoins des fluctuations notables, avec notamment des valeurs anormalement faibles (ca. 5) à 10 et 60 cm de profondeur. Ce sol étant particulièrement pauvre en MO, on peut ici invoquer un probable problème de dosage du carbone et surtout de l'azote. Compte tenu de ces problèmes, et même en écartant les échantillons les plus anomaux, les valeurs de C/N se doivent d'être examinées avec de nécessaires réserves. Ainsi, pour les secteurs pas et peu exploités ces valeurs demeurent voisines de 10, celles du secteur sous usage intensif étant fréquemment assez proches de cette même valeur. Conformément aux données de la littérature évoquées ci-

¹ : Analyseur infrarouge de carbone, azote et soufre (CNS – 2000)

dessus, une valeur de C/N aussi faible tout au long des profils étudiés dénote une MO très altérée dès la surface, sans accentuation perceptible en profondeur. Ce constat ne fait donc que conforter globalement le diagnostic fourni par l'IH.

Un autre paramètre qualitatif important fourni par la pyrolyse Rock-Eval est l'IO. Ce paramètre, qui fait pendant à l'IH, correspond à la quantité de CO₂ émise durant la pyrolyse Rock-Eval et s'exprime en mg de CO₂ × g⁻¹ de COT. Sa valeur est directement liée au degré d'oxydation de la MO, notamment sous forme de groupements oxygénés carboxyliques qui se décomposent aisément durant la pyrolyse en libérant du CO₂. Comme pour les IH on ne dispose que de très peu de données sur les IO de la MO des sols, des végétaux et des litières, voire encore moins. Disnar *et al.*, (2003) fournissent des valeurs de IO qui vont de 193 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT pour des sols sous forêt de Chênes et Houx, à 216 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT pour des sols cultivés de Montargis (France), soit des valeurs voisines de 200, malgré la grande différence des deux milieux considérés. Volland-Tuduri (2005) a mesuré des valeurs nettement plus faibles pour les litières de Cerrado et de pâturage à *Brachiaria brizantha* (Hochst. Stapf.) du Brésil évoquées précédemment, soit respectivement 86 et 108 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT.

Si l'on se réfère aux valeurs citées ci-dessus, les valeurs d'IO qui globalement sont supérieures à 250 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT témoignent d'une certaine oxydation, dégradation de la MO. L'examen des données présentées dans le tableau 5.1 qui montrent clairement une relation inverse entre valeurs d'IO et de COT va tout à fait dans le sens d'une augmentation des teneurs en groupements oxygénés de la MO parallèlement à sa minéralisation partielle. Il arrive fréquemment dans des sédiments récents et éventuellement des sols, que les valeurs d'IO soient influencées par la décomposition, durant l'analyse, de carbonates mal cristallisés, même présents en très faibles proportions (Disnar, comm. pers). Ce phénomène qui pourrait expliquer les valeurs d'IO assez fortes ici observées en profondeur semble néanmoins pouvoir être écarté, une présence de carbonates ne pouvant être exclue localement, mais *a priori* pas régionalement.

D'autres indices fournis par la pyrolyse Rock-Eval et qui peuvent présenter un intérêt immédiat sont l'intensité et la forme du pic d'émission de composés hydrocarbonés durant la pyrolyse S₂ (mg de HC × g⁻¹ de sol), déjà évoqué ci-dessus. La forme générale de ce signal, et notamment sa dissymétrie peuvent être appréciées de diverses manières (e.g. par déconvolution), mais avant tout et de manière immédiate, grâce au paramètre R400 (Disnar *et*

al., 2003). En fait, le paramètre R400 exprime la proportion de MO la plus labile, soit plus précisément la proportion de constituants organiques émis entre 200 et 400°C durant la pyrolyse. Si l'on considère les données présentées dans le tableau 5.4, on peut observer une augmentation du paramètre R400 et donc de la proportion du carbone labile en profondeur dans toutes les trois secteurs d'étude. Ce résultat est tout à fait contraire à ce qu'avaient observé Disnar *et al.*, (2003) pour une large variété de sols de diverses provenances. La différence majeure entre ces sols et ceux de la région d'étude semble résider dans les teneurs en MO très faibles à Las Cardas, cette MO semblant par ailleurs très altérée dès la surface du sol (cf. supra). Partant de ce constat, il peut être envisagé, à titre d'hypothèse, que l'augmentation de la part de MO labile soit simplement due à son oxydation progressive vers la base des profils de sols. Cette augmentation pourrait à la fois provoquer des ruptures de liaisons stables par oxydation (liaisons C-C) et la formation de groupes fonctionnels labiles, groupes carboxyliques, notamment.

Tableau 5.4. Valeurs de R400* de la MO des sols de la zone de Las Cardas.

*Proportion de carbone le plus labile libéré entre 200 et 400°C durant la pyrolyse de la MO.

Profondeur (cm)	R400 Sans usage	R400 Usage extensif	R400 Usage intensif
0 - 5	0,34	0,33	0,32
5 - 10	0,31	0,30	0,41
10 - 20	0,35	0,36	0,42
20 - 30	0,39	0,40	0,49
30 - 40	0,40	0,44	0,52
40 - 50	0,43	0,41	0,51
50 - 60	0,46	0,44	0,52
60 - 70	0,49	0,46	0,57
70 - 80	0,50	0,51	0,56
80 - 90	0,45	0,53	0,50
90 - 100	0,48	0,56	0,53

I.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

Comme nous venons de le voir dans la section précédente, les trois secteurs d'étude se distinguent immédiatement par leurs stocks respectifs de COT, ceux-ci diminuant notablement avec l'intensité de l'usage du sol, soit 37,1, 27,2 et 13,5 Mg·ha⁻¹, du secteur

préservé à celui sous usage intensif. Les différents secteurs d'étude ne se distinguent aussi que peu, voire plutôt pas, par des changements qualitatifs de la MO, celle-ci étant altérée dès la surface du sol. Néanmoins, on note que si ces trois secteurs se distinguent assez mal par les teneurs maximales de COT trouvées au sommet des profils et qu'ils enregistrent tous une forte baisse du carbone organique dans les niveaux immédiatement sous-jacents, passés les 20 ou 30 premiers centimètres de profondeur les teneurs en COT apparaissent d'autant plus faibles que l'exploitation est importante. Ceci nous amène, à l'instar de Franzluebbers (2002), à considérer la répartition des stocks de carbone entre les parties supérieure et inférieure des profils, soit entre 0-30 cm et 30-100 cm de profondeur (tableau 5.4). Ainsi, on constate immédiatement que, malgré la diminution des stocks de carbone globaux (0-100cm), cette répartition demeure identique entre le secteur préservé et celui sous exploitation extensive, soit un peu plus de 60% de ce stock dans les 30 cm supérieurs du sol. Il n'en va pas de même dans le secteur sous exploitation intensive où la décroissance de 50% qu'a enregistrée le stock de carbone total par rapport au secteur préservé (13,5 contre 37,1 Mg·ha⁻¹ ; tableau 5.5), a accentué le déséquilibre de répartition de ce stock, la part de celui-ci s'élevant désormais à près de 70 % entre 0 et 30 cm de profondeur. Ainsi, il semblerait que la diminution des intrants végétaux au sol qu'entraîne la mise en pâture, déplace simplement l'équilibre de l'écosystème lorsque la densité des animaux demeure faible. En revanche, lorsqu'elle est élevée, cet équilibre n'est vraisemblablement plus préservé et la végétation ne réussit plus à renouveler le stock de carbone. L'accentuation de la diminution de la part de ce stock dans la partie inférieure du sol (où les teneurs de COT sont effectivement très faibles) pourrait au moins *pro parte* s'expliquer par une diminution du matériel racinaire. Selon cette interprétation, la seule utilisation des stocks comme paramètre d'estimation de la qualité d'un sol et sa résistance à l'exploitation serait donc insuffisante.

Tableau 5.5. Carbone organique total (COT) sous les trois modes d'usage pour la zone de Las Cardas. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

*Proportion par rapport au stock de carbone organique total du secteur préservé.

	Stock de carbone organique (Mg·ha ⁻¹)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur sans usage	37,1	23,0 (62 %)	14,1 (38 %)	1,63
Secteur usage extensif	27,2 (73 %)*	16,5 (61 %)	10,7 (39 %)	1,54
Secteur usage intensif	13,5 (36 %)*	9,3 (69 %)	4,2 (31 %)	2,21

I.5. Conclusions sur la zone de Las Cardas

Les teneurs en COT qui sont globalement faibles dans les 3 secteurs d'étude, enregistrent aussi une forte diminution dans les 20 à 30 premiers cm des profils. Au-delà, les teneurs de MO qui sont très faibles, peuvent être qualifiées de résiduelles ($< 2,19 \text{ g COT} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Les teneurs moyennes en COT (et les stocks de carbone) du sol diminuent avec l'intensité croissante de l'exploitation du territoire.

Les faibles valeurs de IH et les valeurs de IO assez élevées enregistrées dès la surface du sol indiquent une MO d'emblée très dégradée. Cette dégradation se poursuit néanmoins dans la profondeur des profils étudiés.

II. Évolution quantitative et qualitative de la matière organique dans la zone de Talhuén

II.1. Généralités

Le bassin versant de Talhuén se situe à 5 km au nord de la ville d'Ovalle, province de Limarí, région de Coquimbo (30°35' S ; 71°15' W).

Pour cette zone d'étude l'échantillonnage fut réalisé uniquement sur des secteurs soumis à deux types d'usages: un secteur protégé depuis 1957 et une parcelle sous culture d'artichauts, donc sous usage intensif.

II.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone de Talhuén et évolution dans les profils

Comme à Las Cardas, les profils de sols des deux secteurs d'étude montrent de faibles teneurs en COT dès les horizons superficiels (tableau 5.6). En effet, ces teneurs varient entre 0,81 et 14,03 g·kg⁻¹ pour le secteur mis en réserve et de 0,22 à 8,58 g·kg⁻¹ pour celui qui fait l'objet d'un usage intensif. Ces teneurs enregistrent aussi une très forte décroissance de entre 0 et 30 cm de profondeur, puis tendent à se stabiliser.

Tableau 5.6. Données quantitatives (COT, Stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de deux secteurs sous deux modes d'usage différents à Talhuén.

Profondeur (cm)	COT (g×kg ⁻¹)	Stock de C (Mg×ha ⁻¹)	S ₂ (mg HC×g sol ⁻¹)	IH (mg HC×g COT ⁻¹)	IO (mg CO ₂ ×g COT ⁻¹)
Secteur sans usage					
0 - 5	14,03	12,15	2,87	199	275
5 - 10	8,88	7,58	1,20	124	314
10 - 20	5,79	9,88	0,58	101	376
20 - 30	2,34	4,02	0,20	106	596
30 - 40	1,31	2,29	0,14	125	936
40 - 50	0,96	1,67	0,12	139	1330
50 - 60	0,78	1,35	0,09	136	1691
60 - 70	0,96	1,70	0,09	130	1637
70 - 80	0,81	1,44	0,08	112	1880
80 - 90	0,89	1,58	0,10	142	2001
90 - 100	0,93	1,70	0,08	110	1431
Secteur usage intensif (culture d'artichauts)					
0 - 5	8,16	7,47	2,25	186	309
5 - 10	8,58	7,72	1,58	171	227
10 - 20	3,95	6,95	0,44	111	387
20 - 30	2,81	5,11	0,53	167	472
30 - 40	1,16	2,02	0,17	213	669
40 - 50	1,00	1,66	0,15	186	774
50 - 60	0,57	1,00	0,10	232	1144
60 - 70	0,55	0,95	0,11	208	1395
70 - 80	0,43	0,76	0,06	152	1706
80 - 90	0,46	0,69	0,08	147	1866
90 - 100	0,22	0,30	0,05	253	1667

Globalement la situation est similaire à celle observée à Las Cardas, avec des teneurs en COT supérieures pour la zone de Talhuén. En profondeur les faibles valeurs de COT témoignent d'apports organiques insuffisants, ainsi qu'une distribution irrégulière de la MO dans le profil (i.e. d'un faible transfert vertical). Cela semble avant pouvoir s'expliquer par l'absence de précipitations susceptibles de favoriser la percolation de constituants solubles au sein du profil.

Comme nous l'avons signalé préalablement, l'hypothèse d'une altération de la MO un peu plus accentuée dans la profondeur des profils semble ici confirmée par les valeurs de COT plus faibles trouvées en profondeur dans le secteur cultivé que dans celui mis en réserve (tableau 5.6).

II.3. Qualité de la matière organique

La nature et l'origine des paramètres qualitatifs (IH, IO, S_2) a été déjà expliquée dans les paragraphes précédents.

Dans le secteur non exploité, les valeurs d'IH sont faibles et proches à celles trouvées dans le secteur préservé de Las Cardas. Ces faibles valeurs ($< 200 \text{ mg de HC} \times \text{g}^{-1}$ de COT) confirment une MO déjà très dégradée dès le sommet des profils. Le degré de dégradation s'accroît en profondeur, sauf dans les niveaux les plus profonds du secteur à usage intensif.

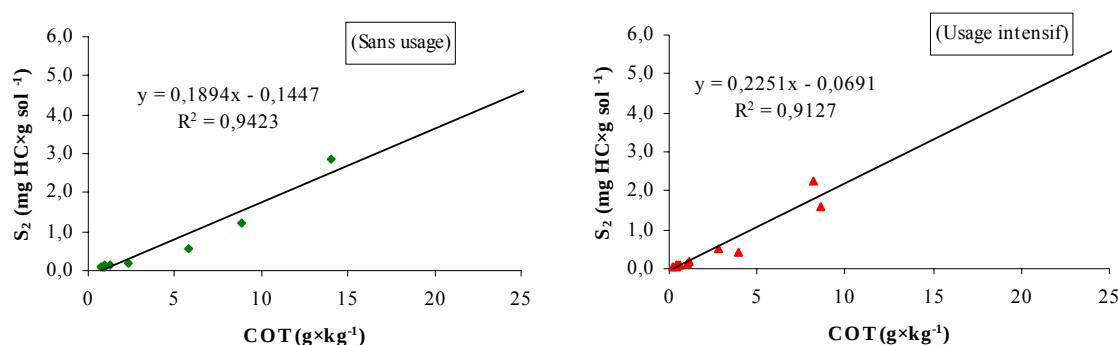


Figure 5.2. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de Talhuén.

Ainsi, dans le secteur exploité les valeurs d'IH sont assez fluctuantes mais globalement plus élevées que dans le secteur préservé.

Afin de tenter d'expliquer la décroissance du IH avec la profondeur on s'appuiera sur l'analyse des digrammes S_2 vs COT. Pour les deux secteurs d'étude, ces diagrammes nous montrent que pour les deux secteurs les droites définies par l'alignement des points de données interceptent l'axe des abscisses pour des valeurs de COT qui diminuent avec l'intensité de leur exploitation (Figure 5.2), cette valeur atteignant $0,76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour le secteur sans usage.

Si l'on considère la pente de la droite de corrélation S_2 vs COT on constate que sa valeur est respectivement égale à 189 et 225 (mg HC $\cdot$ g $^{-1}$ de sol) pour le secteur sans usage et sous usage intensif. Ces valeurs optimales relativement proches des valeurs d'IH de surface,

ce qui souligne à nouveau le caractère très peu discriminant de critères de qualité de la MO tels que l'IH pour distinguer les sols de la zone d'étude soumis à différents usages.

L'IO prend des valeurs en surface proches de 300 mg de $\text{CO}_2 \times \text{g}^{-1}$ de COT et augmente progressivement en profondeur jusqu'à atteindre des valeurs voisines de 2000 mg de $\text{CO}_2 \times \text{g}^{-1}$ de COT. A l'inverse de Las Cardas, les IO montrent une croissance en profondeur d'autant plus forte que l'usage est moins intense, même si la différence entre les courbes des secteurs sans usage et sous usage intensif est faible. Cela s'explique par une décroissance des stocks plus homogène tout au long des profils et moins abrupte sur les horizons de surface (entre -0,299 et -0,065 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 50 cm de profondeur pour la condition sans usage et de -0,178 à -0,065 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour la condition intensive) expliquée par des textures plus argileuse (Soil Survey Staff, 1999 ; Soto *et al.*, soumis). Tout cela témoigne d'une certaine oxydation de la matière organique (dégradation de la MO), ce que conforte la relation inverse entre les valeurs d'IO et COT (tableau 5.6).

Comme pour le cas de Las Cardas précédemment analysé, les valeurs de R400 sont très faibles au sommet de chaque profil et très proches pour les deux modes d'usage (0,27 pour le secteur sans usage et 0,31 pour celui sous culture intensive). L'accroissement des valeurs de ce paramètre avec la profondeur indique une augmentation de la proportion de carbone labile dans les deux secteurs d'étude. En outre, contrairement à Las Cardas, dans les 20 premiers cm le taux de croissance du R400 est assez constant pour les deux modes d'usages. Entre 20 et 100 cm de profondeur, la part de MO labile augmente presque exponentiellement dans le profil de sol sous usage intensif (tableau 5.7).

L'explication envisagée pour cette observation a été déjà évoquée dans les paragraphes précédents, à savoir que l'augmentation de la part de matière organique labile soit due à l'oxydation progressive de la MO vers la base des profils de sols.

Tableau 5.7. Valeurs de R400* de la MO des sols de la zone de Talhuén.

*Proportion de carbone le plus labile libéré entre 200 et 400°C durant la pyrolyse de la MO..

Profondeur (cm)	R400 Sans usage	R400 Usage intensif
0 - 5	0,27	0,31
5 - 10	0,28	0,28
10 - 20	0,30	0,34
20 - 30	0,38	0,36
30 - 40	0,41	0,38
40 - 50	0,43	0,41
50 - 60	0,46	0,46
60 - 70	0,47	0,44
70 - 80	0,47	0,52
80 - 90	0,49	0,49
90 - 100	0,48	0,53

II.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

D'après les valeurs d'IH, il n'y a pas ou très peu d'évolution de la MO passés les 20 ou 30 premiers cm de profondeur. Tout au long des profils, la parcelle sous usage intensif présente des valeurs d'IH légèrement supérieures à celles du secteur mis en réserve. Cela peut s'expliquer par l'enfouissement de MO fraîche, peu ou pas dégradée, par le travail mécanique du sol. En dépit de cela, dans les deux secteurs les valeurs d'IO croissent très nettement et assez régulièrement.

Sur les 20 premiers cm la variation de la proportion de carbone labile augmente de manière plus ou moins constante pour les deux modes d'usage, mais avec une intensité ($\delta R400/\delta \text{profondeur}$) deux fois plus élevée dans le secteur sous usage intensif. À partir de 20 cm le rapport $\delta R400/\delta \text{profondeur}$ chute brusquement de 700% pour l'usage intensif, celui du secteur en réserve diminuant que de 300%. Ce quotient prend même des valeurs négatives, qui suggère une décroissance de la part de MO labile. Cela peut s'expliquer par une transformation rapide de la MO dans les premières couches du sol, ce qui témoigne de conditions d'altération rapides et entraîne une forte diminution des stocks de C en profondeur. Nous constatons donc ici l'influence de l'activité agricole sur l'évolution de la MO et des stocks de carbone.

L'analyse de la répartition des stocks de carbone dans les sols montre d'abord une diminution de $10,74 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ entre le secteur exploité intensivement et le secteur sans usage. Cette diminution globale s'accompagne d'une diminution différentielle entre les niveaux 0-30 cm et 30-100 cm. Pour le secteur exploité l'équilibre entre les apports superficiels et profonds de MO n'existe plus. Apparemment, le travail du sol accélère la minéralisation de la MO (Martínez *et al.*, 2008), ce qui doit donc augmenter le flux de CO_2 du sol vers l'atmosphère via l'oxydation du carbone (Reicosky *et al.*, 1997). De plus, les apports racinaires sont probablement inexistants ou au moins non significatifs dans la profondeur du sol (tableau 5.8).

Tableau 5.8. Carbone organique total (COT) sous les deux modes d'usage pour la zone de Talhuén. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

*: En relation au carbone organique totale du secteur sans usage.

	Stock de carbone organique ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur sans usage	45,3	33,6 (74 %)	11,7 (26 %)	2,87
Secteur usage intensif	34,6 (76 %)*	27,3 (79 %)	7,4 (21 %)	3,69

II.5. Conclusions sur la zone de Talhuén

Les teneurs et les stocks de COT du sol diminuent d'autant plus que l'intensité de l'intervention est importante.

Les teneurs de COT présentent une forte diminution dans les 30 premiers cm.

Les faibles valeurs de IH et les valeurs de IO assez élevées dès la surface du sol indiquent une MO d'emblée très dégradée comme cela a précédemment vu dans la zone de La Cardas.

L'exploitation des terres entraîne une diminution du stock de carbone et un accroissement du déséquilibre de la répartition de ce stock entre surface (<30 cm) et profondeur. Cette perte pourrait être due au travail du sol.

III. Analyse quantitative et qualitative de la matière organique des sols de Flor del Norte et impact de différents usages des terres

III.1. Généralités

La région de Flor del Norte est située à 7 km au nord de la ville d'Ovalle et fait partie du bassin versant de Talhuén (30°34' S ; 71°15 W).

La géologie, la lithologie et les types de sols correspondent à ceux de Talhuén, décrits dans les paragraphes précédents.

La zone d'échantillonnage comprend deux secteurs sous deux modes d'usage différents : un secteur mis en réserve (depuis 1990) et un soumis à un usage intensif (noyer et prairie de luzerne).

III.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone de Flor del Norte et évolution dans les profils

Dans le secteur de Flor del Norte les teneurs en COT sont entre 2 et 3 fois plus importantes que dans les zones de Las Cardas et de Talhuén. Ainsi, les valeurs de COT sont comprises entre 1,72 et 13,06 g·kg⁻¹ pour le secteur sans usage et entre 3,67 et 17,58 g·kg⁻¹ pour le secteur sous usage intensif.

Les teneurs en COT du sol chutent moins brusquement avec la profondeur que dans les autres sites. En effet, les teneurs passent de 13 à 5 g·kg⁻¹ et de 17 à 3 g·kg⁻¹ de la surface vers 30 cm de profondeur, respectivement dans les secteurs sans usage et sous usage intensif (tableau 5.9).

Tableau 5.9. Données quantitatives (COT, stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de deux secteurs sous deux modes d'usage différents à Flor del Norte.

Profondeur (cm)	COT (g×kg ⁻¹)	Stock de C (Mg×ha ⁻¹)	S ₂ (mg HC×g sol ⁻¹)	IH (mg HC×g COT ⁻¹)	IO (mg CO ₂ ×g COT ⁻¹)
Secteur sans usage					
0 - 5	13,06	11,27	2,72	219	264
5 - 10	12,95	11,14	1,70	125	195
10 - 20	9,81	16,93	1,16	111	226
20 - 30	5,71	9,84	0,55	97	266
30 - 40	4,82	8,28	0,47	97	275
40 - 50	3,68	6,35	0,38	108	359
50 - 60	2,58	4,43	0,29	112	363
60 - 70	2,78	3,22	0,28	102	365
70 - 80	2,13	2,47	0,21	102	388
80 - 90	1,78	2,04	0,25	149	560
90 - 100	1,72	2,01	0,26	151	466
Secteur usage intensif (luzerne et noyers)					
0 - 5	17,58	15,05	3,12	179	251
5 - 10	13,02	11,14	1,80	137	250
10 - 20	8,67	14,82	0,98	111	278
20 - 30	4,48	7,63	0,46	103	382
30 - 40	3,43	5,82	0,35	105	497
40 - 50	4,72	7,84	0,52	109	574
50 - 60	3,35	5,57	0,37	135	821
60 - 70	2,77	4,37	0,29	118	773
70 - 80	1,74	2,13	0,17	106	721
80 - 90	1,13	1,03	0,23	160	979
90 - 100	3,67	3,45	1,04	197	465

Comme nous l'avons déjà souligné précédemment, ce type de profil exprime la dynamique du COT dans les sols étudiés, à savoir un apport de MO essentiellement via la partie aérienne de la végétation, puis sa dégradation progressive à proximité de la surface. Cependant, les valeurs de COT qui sont ici moins faibles en profondeur que dans les zones de Las Cardas et de Talhuén, témoignent d'apports de MO plus importants par les systèmes racinaires ainsi et probablement surtout d'un transfert plus actif de MO de la surface des profils vers la profondeur.

III.3. Qualité de la matière organique

L'analyse de la variation des IH au sein des profils montre un comportement équivalent aux deux zones précédentes (Las Cardas et Talhuén), les valeurs étant très basses ($< 200 \text{ mg de HC} \times \text{g}^{-1}$ de COT) mais cependant plus proches de celles de la zone de Talhuén. Comme cela a déjà été évoqué précédemment ces faibles valeurs d'IH indiquent une MO très dégradée dès le sommet de chaque profil.

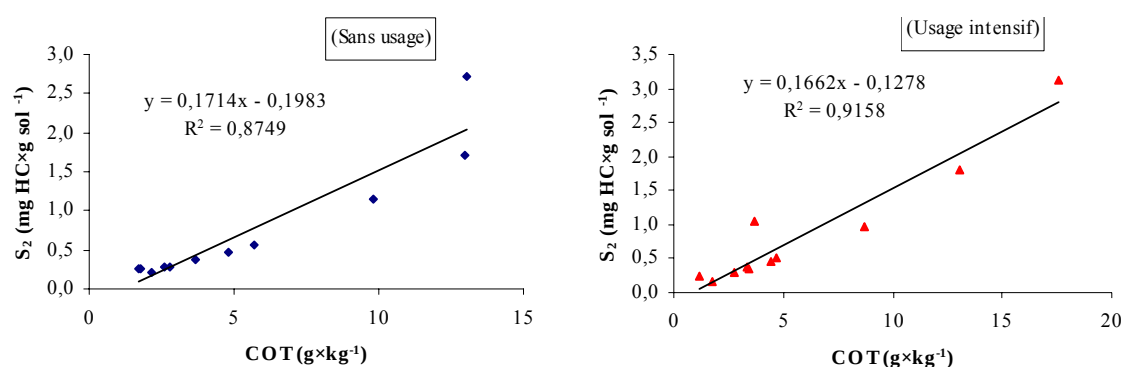


Figure 5.3. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de Flor del Norte.

L'analyse des valeurs d'IH présentées dans le tableau 5.9 montre qu'une diminution notable se produit dans les 30 premiers cm. Ensuite on n'observe plus de diminution de ce paramètre et même une augmentation de l'IH vers la base des deux profils.

L'étude des diagrammes S_2 vs COT montre que les droites interceptent l'axe des abscisses pour des valeurs de COT qui diminuent avec l'intensité de l'exploitation (Figure 5.3). Ceci est notamment conforme avec des valeurs d'IH relativement élevées à la base du profil du sol cultivé. Ces valeurs sont aussi accompagnées de teneurs en COT qui sont aussi relativement élevées. Ceci nous amène à invoquer un possible transfert de MO en profondeur, favorisé par la production végétale et l'irrigation. Vers la base du profil, ce transfert peut aussi se trouver arrêté par la présence d'un horizon induré (Oyarzún et Alvarez, 2001).

Les valeurs moyennes d'IH obtenues à partir de la pente des droites S_2 vs COT et qui sont de 170 et 166, respectivement pour le secteur sans usage et le secteur cultivé (Figure 5.3), ne montrent cependant pas de discrimination globale de la qualité de la MO entre les deux secteurs.

Comme dans les zones précédentes les valeurs de l'indice IO témoignent d'une certaine dégradation de la MO. En effet, en surface cet indice présente des valeurs voisines de 300 mg de $\text{CO}_2 \times \text{g}^{-1}$ de COT pour atteindre des valeurs allant de 560 à 980 mg de $\text{CO}_2 \times \text{g}^{-1}$ de COT à 1 m de profondeur. La relation inverse entre l'IO et le COT déjà commentée précédemment se confirme et dénote une probable augmentation des teneurs en groupements oxygénés de la MO parallèlement à sa minéralisation partielle (tableau 5.9).

Si l'on analyse le paramètre R400, on observe une augmentation modeste de ses valeurs en profondeur dans les deux secteurs d'étude. Même si les teneurs de matière organique sont ici plus importantes qu'à Las Cardas et Talhuén, le niveau d'altération (oxydation) de la MO en profondeur semble toujours s'accroître en profondeur, mais cependant moins que dans les zones considérées précédemment. A cet égard, il paraît significatif de remarquer que la valeur de paramètre R400 atteinte à la base du profil du secteur cultivé n'est que légèrement supérieure à ce qu'elle était en surface, i.e. 0,28 contre 0,26 (tableau 5.10). Nous reviendrons sur ce dernier point ci-après.

Tableau 5.10. Proportion de carbone labile libérée entre 200 et 400°C (R400) pour la zone de Flor del Norte.

Profondeur (cm)	R400 Sans usage	R400 Usage intensif
0 - 5	0,26	0,26
5 - 10	0,26	0,26
10 - 20	0,27	0,27
20 - 30	0,30	0,30
30 - 40	0,32	0,31
40 - 50	0,34	0,32
50 - 60	0,35	0,38
60 - 70	0,34	0,35
70 - 80	0,45	0,36
80 - 90	0,37	0,40
90 - 100	0,33	0,28

III.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

En ce qui concerne les valeurs d'IH, elles sont initialement plus importantes dans le secteur sans usage que dans le secteur cultivé (218 mg de HC×g⁻¹ de COT contre 179 mg de HC×g⁻¹ de COT). Ici encore, comme cela a déjà été signalé dans les paragraphes précédents, une forte diminution de l'IH se produit dans les 30 premiers cm. En dépit de ces différences, vers le milieu des profils, on observe des valeurs d'IH voisines dans les deux secteurs (tableau 5.9). Tout à la base du profil du sol du secteur cultivé, on observe une valeur de IH relativement élevée, i.e. voisine de 200 mg de HC×g⁻¹ de COT. Cette valeur, qui s'accompagne de valeurs de COT et de paramètre R400 elles-mêmes relativement élevées (3,67 g×kg⁻¹ et 0.28) témoigne vraisemblablement d'un apport de MO fraîche des végétaux cultivés (luzerne et/ou noyers).

L'ensemble de ces observations apparaît témoigner de conditions particulières à la zone d'échantillonnée. Ainsi, le secteur sans usage ne posséderait pas assez de végétation susceptible de fournir la MO nécessaire à l'équilibre de l'écosystème. En conséquence, les apports aériens et racinaires seraient inexistant, ce qui aurait comme conséquence une dynamique du carbone très proche de celle d'un secteur à usage intensif.

Dans le cas du secteur sous agriculture intensive les apports réguliers de MO et d'engrais préservent un certain équilibre, même si le travail mécanique peut avoir une forte influence sur la minéralisation du carbone et sur les flux de CO₂ du sol vers l'atmosphère (Franzluebbers, 2002).

De manière inverse à Talhuén, les valeurs de l'indice IO du secteur sous usage intensif sont plus importantes que celles du secteur sans usage tout au long du profil. De plus, la croissance des IO en profondeur est d'autant plus importante que l'usage est intensif. De la même façon qu'à Las Cardas cela s'explique probablement par la forte décroissance des stocks de carbone, qui fait augmenter d'une manière très importante les valeurs de cet indice. Les valeurs atteintes sous usage intensif sont comparables à celles des sols cultivés de la région de Montargis (Disnar *et al.*, 2003).

L'analyse des proportions entre les stocks des épaisseurs 0-30 cm et de 30-100 cm pour les deux modes d'usage nous montre que le quotient de ces stocks partiels demeure presque inchangé malgré la mise en culture (1,71 pour la condition sans usage et 1,61 pour la

condition sous usage intensif, tableau 5.11). Ainsi, on peut admettre que contrairement à la mise en pâture précédemment évoquée à propos de la zone de las Cardas, la mise en culture se traduit plutôt par un accroissement de la production végétale locale qui se traduit par un modeste accroissement des teneurs en carbone du sol sans véritablement perturber la distribution des stocks de MO dans les profils et donc sans conséquence notable sur le fonctionnement de l'écosystème (au moins selon l'indicateur observé). Un autre facteur qui peut être invoqué en ce qui concerne la comparaison de cette zone d'étude avec le secteur préservé de Las Cardas, est la texture du sol, i.e. celle d'un sableux-limoneux (Soil Survey Staff, 1999), soit une texture moins argileuse que celle de la zone de Talhuén.

Tableau 5.11. Carbone organique total (COT) sous les deux modes d'usage pour la zone de Flor del Norte. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

*: En relation au carbone organique totale du secteur sans usage.

	Stock de carbone organique (Mg·ha ⁻¹)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur sans usage	78,0	48,6 (62 %)	30,2 (38 %)	1,61
Secteur usage intensif	78,9 (100 %)*	49,2 (63 %)	28,8 (37 %)	1,71

L'observation des stocks de carbone (77,99 et 78,88 Mg·ha⁻¹ respectivement pour les conditions sans usage et usage intensif) et l'analyse des dérivées ($\delta\text{Stocks}/\delta\text{profondeur}$) confirment l'hypothèse déjà évoquée, à savoir un comportement très similaire entre les conditions sans usage et avec usage intensif (de -0,349 à -0,041 Mg·ha⁻¹·cm⁻¹ entre 0 et 100 cm pour le secteur sans usage et de -0,339 à -0,041 Mg·ha⁻¹·cm⁻¹ pour le secteur sous agriculture intensive). La dégradation du carbone en profondeur est plus continue que dans les sites précédemment analysés (Las Cardas, Talhuén).

Les valeurs du R400 au sommet de chaque profil (0,26 pour les deux situations d'usage) sont les plus faibles de toutes les zones analysées jusqu'à présent, i.e. Las Cardas et Talhuén, et sont comparables aux horizons A_f-B_w des Mollisols du Puy Mercœur analysés par Disnar *et al.* (2003).

La variation de la proportion de C labile en profondeur est très faible et très comparable entre les deux modes d'utilisation. Ceci conforte notre interprétation précédente, c'est à dire que la mise en culture semble globalement se traduire par un simple remplacement

d'une flore par une autre, sans perturbation notable du cycle du carbone du sol et donc de l'écosystème, selon le critère ici considéré (tableau 5.10).

III.5. Conclusions sur la zone de Flor del Norte

Les teneurs en COT sont moins faibles que les zones préalablement analysées dans l'ensemble des secteurs étudiés.

Il n'y a pas une différence significative entre les teneurs en COT et stocks de carbone pour les différents modes d'usages.

La distribution des teneurs et stock de carbone dans les sols est beaucoup plus équilibrée que pour les zones préalablement analysées.

Les faibles valeurs d'IH décroissent plus fortement dans les 30 premiers cm. De 30 à 100 cm la décroissance se stabilise et elle est proche de 0. Elles confirment la présence d'une MO fortement altérée.

Les valeurs de IO enregistrées dès la surface du sol, croissantes tout au long du profil, vont dans la même direction que les IH et indiquent une MO d'emblée très dégradée.

IV. Évolution quantitative et qualitative de la matière organique de la zone de Camarico

IV.1. Généralités

La région de Camarico est située à 21 km au sud-ouest de la ville d'Ovalle (30°45' S ; 71°20 W).

La zone d'échantillonnée se situe dans un secteur soumis à un usage intensif de production végétale (vignoble).

IV.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone de Camarico et évolution dans les profils

Par rapport aux teneurs de carbone organique trouvées dans les zones de Las Cardas (tableau 5.1), Talhuén (tableau 5.6) et Flor del Norte (tableau 5.9), Camarico présente des valeurs de COT supérieures tout au long du profil, soit de 1,49 à 20,28 g·kg⁻¹ entre 0 et 100 cm de profondeur (tableau 14). La décroissance de ces teneurs reste cependant modérée, progressive, entre les niveaux de surface et les couches profondes.

IV.3. Qualité de la matière organique

En dépit de teneurs en COT relativement élevées par rapport aux précédents sites étudiés, l'analyse des IH montre des valeurs très faibles (< 200 mg de HC× g⁻¹ de COT) dès le sommet des profils et n'évoluant que très peu en profondeur. Ceci indique ici encore une matière organique fortement dégradée peu de temps après son incorporation dans le sol (tableau 5.12).

Tableau 5.12. Données quantitatives (COT, Stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) d'un secteur de vignoble à Camarico.

Profondeur (cm)	COT (g×kg ⁻¹)	Stock de C (Mg×ha ⁻¹)	S ₂ (mg HC×g sol ⁻¹)	IH (mg HC×g COT ⁻¹)	IO (mg CO ₂ ×g COT ⁻¹)
Secteur usage intensif (vignoble)					
0 - 5	20,28	14,01	2,49	134	160
5 - 10	21,64	14,98	2,46	122	153
10 - 20	16,83	23,88	1,95	110	167
20 - 30	18,41	26,21	1,60	89	163
30 - 40	13,21	10,03	1,22	86,	164
40 - 50	12,88	11,60	0,91	68	153
50 - 60	7,34	9,39	0,58	85	258
60 - 70	5,25	7,22	0,45	110	315
70 - 80	4,74	6,24	0,39	96	379
80 - 90	1,49	1,40	0,17	105	600
90 - 100	2,87	2,07	0,29	157	326

Le comportement des IH n'échappe pas à la réalité jusqu'à présent observée : des IH qui diminuent fortement dans les 30 premier cm, suivie d'un comportement plus aléatoire mais avec de très faibles changements entre 30 et 100 cm (tableau 5.12).

L'analyse du diagramme S₂ vs COT présenté dans la Figure 4 montre que les points de données ne s'alignent pas bien selon une droite mais plutôt selon une courbe. Ainsi, l'hypothèse précédemment évoquée d'une altération de la MO un peu plus accentuée dans la profondeur des profils semble se confirmer de nouveau, mais cette fois avec une accentuation particulière de l'altération de la MO (que dénote sa valeur de IH), avec la diminution des teneurs en COT. Il convient cependant de remarquer que cette évolution assez singulière ne s'inscrit en fait que dans une gamme de IH de valeurs très faibles et d'extension limitée entre les 134 mg HC·g⁻¹ de COT observés en surface du sol et celle de 68 mg HC·g⁻¹ de COT à une profondeur voisine de 50 cm.

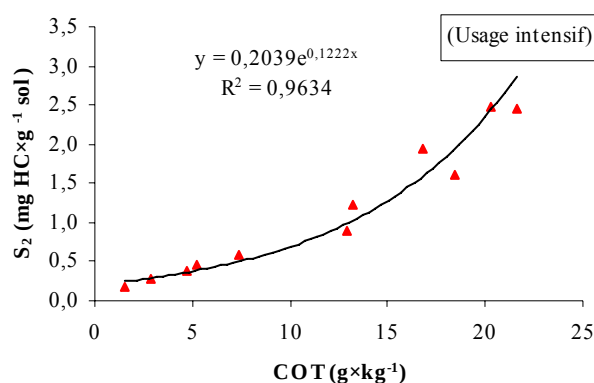


Figure 5.4. Relation S₂ vs COT par type d'usage, zone de Camarico.

En surface l'IO prend des valeurs en surface proches de 160 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT, évoluant jusqu'à des valeurs voisines de 400 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT à 100 cm de profondeur. Ce sont les valeurs les plus basses de toutes les zones analysées jusqu'à présent, la différence des valeurs trouvées à 0 et 100 cm étant très faible.

La relation inverse IO – COT est toujours vérifiée sur cette zone. L'argument d'augmentation des teneurs en groupements oxygénés de la MO en parallèle à sa minéralisation progressive semble se confirmer (tableau 5.12).

Comme partout ailleurs l'observation des R400 nous indique une augmentation de la proportion de carbone labile avec la profondeur (tableau 5.13). La règle semble se confirmer puisque on trouve la même tendance qu'à Las Cardas, Talhuén et Flor del Norte. Il existerait donc une augmentation de la part de MO labile due à son oxydation progressive à la base du profil.

Cela montre une dégradation déjà présente de la MO dans tous le profil, accompagné d'une distribution plus homogène de cette MO au sein du sol que dans les autres zones analysées, à la fois sur le plan quantitatif (COT et stock) et qualitatif (IH, IO).

Tableau 5.13. Proportion de carbone labile et non labile libéré entre 200 et 400°C (R400) pour la zone de Camarico.

Profondeur (cm)	R400 Usage intensif
0 - 5	0,22
5 - 10	0,22
10 - 20	0,21
20 - 30	0,22
30 - 40	0,24
40 - 50	0,24
50 - 60	0,24
60 - 70	0,31
70 - 80	0,34
80 - 90	0,35
90 - 100	0,45

IV.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

Comme nous venons de le signaler, l'IH et donc la qualité de la MO évolue très discrètement avec la profondeur, après les 30 premiers cm. Ainsi l'IO évolue aussi d'une manière assez discrète en profondeur. Dans ce cas particulier, le type de culture (vignes) du site améliore la distribution de la MO tout au long du profil, à la fois sur le plan quantitatif et qualitatif. Les apports aériens (chute de feuille) et racinaires de MO de la vigne, combinés à un travail physique sur le sol, favorisent une meilleure répartition du stock de carbone au sein du sol. À ce sujet un trait morphologique des sols cultivés sous vigne est le déplacement de l'horizon A original vers des billons où sont installées les plantes. On se trouve alors au niveau des billons avec un horizon A_p (apporté) au-dessus de l'horizon A original. Ceci à comme conséquence une distribution racinaire plus régulière tout au long des billons et donc du profil (Álvarez, 2005).

La stratification du stock de C en fonction de la profondeur confirme les arguments déjà énoncés et montre que les valeurs sont comparables aux proportions trouvées dans le secteur mis en réserve de Las Cardas (tableau 5.14).

Tableau 5.14. Carbone organique total (COT) sous usage intensif pour la zone de Camarico. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

	Stock de carbone organique (Mg·ha ⁻¹)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur usage intensif	127,0 (100%)	79,1 (62 %)	47,9 (38 %)	1,65

L'analyse des valeurs de stocks montre une décroissance plus équilibrée tout au long du profil avec des valeurs qui vont de -0,624 à 0,063 Mg·ha⁻¹·cm⁻¹ entre 0 et 100 cm (tableau 5.13). Les décroissances en profondeur sont sensiblement moins accentuées que dans tous les autres sites étudiés, en particulier Las Cardas (sans usage) où la décroissance en surface est extrêmement marquée à proximité de la surface (tableau 5.1).

Les valeurs de stock de carbone organique varient de 1,40 à 14,98 Mg·ha⁻¹ entre 0 et 100 cm de profondeur, le stock total moyen du profil étant de 127 Mg·ha⁻¹, le plus élevé de toutes les zones analysées jusqu'à présent. Cela peut s'expliquer par le type d'usage et la gestion de la ferme. En effet, et comme nous l'avons déjà expliqué, Camarico est sous culture de vigne, un type d'usage où il existe des apports aériens et racinaires de MO tout au long de la vie du vignoble. D'un autre côté Camarico appartient au groupe Nord-américain Del Monte, qui met beaucoup de moyens technologiques sur l'exploitation : des apports d'engrais et d'eau qui accélèrent et favorisent une production primaire plus importante. D'ailleurs, Camarico en particulier produit 35% de la production totale de raisin de table de toute la Province sur une surface d'exploitation qui comprend 253 ha. De plus les textures argilo-limoneuse en surface et argileuse en profondeur favorisent le stockage de MO apportée.

IV.5. Conclusions sur la zone de Camarico

Les teneurs en COT sont beaucoup plus élevées que dans les zones précédemment étudiées (Las Cardas, Talhuén, Flor del Norte). Elles enregistrent aussi une diminution dans les 20 à 30 premiers cm des profils.

Les teneurs moyennes en COT (et les stocks de carbone) du sol diminuent de manière régulièrement croissante avec la profondeur.

Les faibles valeurs de IH enregistrées dès la surface du sol indiquent une MO d'emblée très dégradée. La nature de cette MO et /où son mode d'altération particuliers la distinguent de celle des autres sites étudiés par des valeurs de IH particulièrement faibles mais des valeurs d'IO qui elles, n'augmentent que modérément.

V. Évolution quantitative et qualitative de la matière organique El Palqui

V.1. Généralités

La zone d'El Palqui est située à 32 km au sud-est de la ville d'Ovalle ($30^{\circ}46' S$; $70^{\circ}55' W$).

Comme pour le cas de Camarico la zone échantillonnée se situe dans un secteur soumis à un usage intensif (vignoble).

V.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone d'El Palqui et évolution dans les profils

Les sols se caractérisent par de faibles teneurs en COT (tableau 5.12), les résultats se rapprochant surtout de ceux de la zone de Talhuén (tableau 5.6). Les teneurs varient de 0,53 à 12,79 $g \cdot kg^{-1}$. La décroissance entre les teneurs en surface et les teneurs en profondeur reste modérée.

Tableau 5.15. Données quantitatives (COT, Stock de C) et qualitatives (IH, IO, S_2) de deux secteurs sous deux modes d'usage différents à El Palqui.

Profondeur (cm)	COT ($g \cdot kg^{-1}$)	Stock de C ($Mg \cdot ha^{-1}$)	S_2 ($mg HC \cdot g sol^{-1}$)	IH ($mg HC \cdot g COT^{-1}$)	IO ($mg CO_2 \cdot g COT^{-1}$)
Secteur usage intensif (vignoble)					
0 - 5	12,79	9,63	2,44	172	248
5 - 10	8,52	6,27	2,07	220	309
10 - 20	9,02	13,59	1,14	153	281
20 - 30	5,59	8,82	0,65	137	328
30 - 40	4,40	6,14	0,63	128	289
40 - 50	4,75	5,47	1,16	115	253
50 - 60	1,65	2,26	1,18	171	441
60 - 70	1,85	2,48	1,00	124	340
70 - 80	1,45	2,56	1,04	103	231
80 - 90	0,88	1,55	1,40	121	255
90 - 100	0,53	0,94	1,17	139	354

L'observation des profils montre qu'ils présentent plus ou moins le même comportement que les profils des autres sites. La distribution de la matière organique tout au long du profil reste plus homogène, la décroissance entre la surface et les couches plus profondes étant relativement peu marquée, même si l'analyse porte sur un secteur sous usage intensif.

V.3. Qualité de la matière organique

Le comportement des IH n'échappe pas à la réalité observée jusqu'à présent : des IH avec des valeurs très faibles ($< 200 \text{ mg de HC} \times \text{g}^{-1} \text{ de COT}$) dès le sommet des profils qui diminuent fortement dans les 30 premier cm, suivie d'un comportement plus aléatoire mais avec de très faibles changements entre 30 et 100 cm indiquant une matière organique déjà très dégradée dès la surface du sol (tableau 5.15).

L'analyse du diagramme S_2 vs COT montre que comme à Camarico, les points ne s'alignent pas selon une droite, mais plutôt selon une courbe (Figure 5.5). Assez curieusement cette courbe passe par un minimum avant de réaugmenter à proximité de l'origine des axes. Cette réaugmentation ne traduit en fait que l'existence de valeurs de IH relativement élevées d'échantillons provenant de la profondeur du profil, là où les valeurs de COT sont les plus faibles. Si l'on néglige cela, l'hypothèse d'une altération de la MO d'autant plus accentuée dans la profondeur des profils semble ici confirmée de nouveau, ce qui apparaîtrait logique dans le sens ou la lithologie, les types de sols, voire leur usage (cf. Camarico) sont les mêmes que les secteurs précédents. A ceci, il convient d'ajouter une explication complémentaire pour les valeurs d'IH relativement élevées trouvées en profondeur et qu'accompagnent des valeurs d'IO relativement faibles ($< 400 \text{ mg CO}_2 \times \text{g COT}^{-1}$). Ceci pourrait dénoter des apports de MO fraîche : exsudats racinaires ou MO soluble peu altérée, entraînée en profondeur par les eaux d'irrigation.

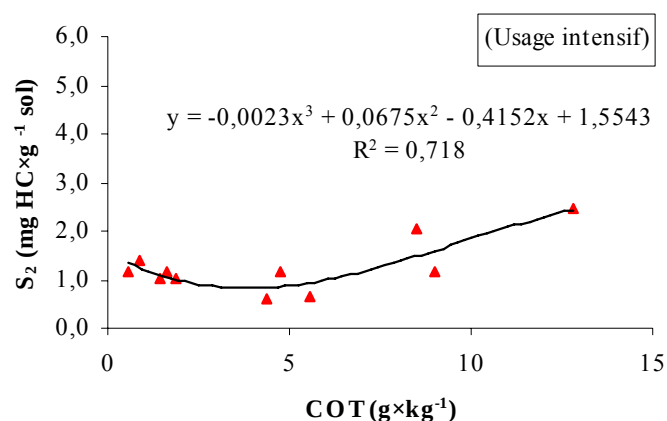


Figure 5.5. Relation S₂ vs COT par type d'usage, zone d'El Palqui.

L'IO prend des valeurs en surface proche de 250 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT, évoluant jusqu'à des valeurs voisines de 350 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT à 100 cm de profondeur. Ces valeurs sont donc relativement faibles et constante tout au long du profil.

La relation inverse IO – COT est toujours observée sur cette zone. L'argument d'augmentation des teneurs en groupements oxygénés de la MO en parallèle à sa minéralisation partielle semble se confirmer, néanmoins l'évolution demeure ici modeste (tableau 5.15).

Comme partout ailleurs l'observation des R400 nous indique une augmentation de la proportion de carbone labile avec la profondeur (tableau 5.14). La règle semble se confirmer puisque on trouve la même tendance qu'à Las Cardas, Talhuén et Flor del Norte. Il existerait donc une augmentation de la part de MO labile à la base du profil. Conformément à ce que nous avons précédemment envisagé, ceci pourrait être dû à l'altération de la MO résiduelle, mais éventuellement aussi à une introduction de MO labile par voie racinaire ou encore par percolation à partir des niveaux supérieurs du sol.

Tableau 5.16. Proportion de carbone labile est non labile libéré entre 200 et 400°C (R400) pour la zone d'El Palqui.

Profondeur (cm)	R400 Usage intensif
0 - 5	0,22
5 - 10	0,22
10 - 20	0,21
20 - 30	0,22
30 - 40	0,24
40 - 50	0,24
50 - 60	0,24
60 - 70	0,31
70 - 80	0,34
80 - 90	0,35
90 - 100	0,45

V.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

De manière analogue à Camarico, l'IH et donc la qualité de la MO, évolue très discrètement avec la profondeur, après les 30 premiers cm. Ainsi l'IO évolue aussi d'une manière assez modérée en profondeur. Comme nous l'avons déjà expliqué pour la zone de Camarico, le type de culture du site (vigne) favorise une meilleure distribution des paramètres quantitatifs et qualitatifs le long du profil. Les apports aériens (chute des feuilles) et racinaires de MO de la vigne, combiné à un travail physique sur le sol, améliorent la répartition du stock de carbone au sein du sol. La présence de billons de plantation due au déplacement de l'horizon A original a comme conséquence une distribution racinaire plus régulière tout au long du profil (Álvarez, 2005).

La stratification du stock de C en fonction de la profondeur confirme les arguments déjà énoncés et montre que les valeurs sont comparables aux proportions trouvées dans le secteur mis en réserve de Las Cardas, ainsi que dans celui aussi cultivé en vigne de Camarico (tableau 5.17).

Tableau 5.17. Carbone organique total (COT) sous usage intensif pour la zone d'El Palqui. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

	Stock de carbone organique (Mg·ha ⁻¹)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur usage intensif	59,7 (100%)	38,3 (64 %)	21,4 (36 %)	1,79

De manière analogue à la zone de Camarico, l'analyse des valeurs de stocks montre une décroissance plus équilibrée tout au long du profil avec des décroissances en profondeur qui évoluent de -0,624 à 0,063 Mg·ha⁻¹·cm⁻¹ entre 0 et 100 cm (tableau 5.16). Ces décroissances sont sensiblement moins fortes que pour tous les autres sites étudiés, en particulier Las Cardas (sans usage) où la décroissance est extrêmement marquée en surface (tableau 5.1).

Les valeurs de stock de carbone organique varient de 0,94 à 13,59 Mg·ha⁻¹ entre 0 et 100 cm de profondeur, le stock total moyen du profil étant de 59,72 Mg·ha⁻¹.

L'essentiel des explications de ces valeurs a déjà été évoqué dans les paragraphes précédents : un type d'usage (vignoble) où il existe des apports constant aériens et racinaires de MO, et une gestion qui met en œuvre beaucoup de moyens technologiques sur l'exploitation : des apports d'engrais et d'eau qui accélèrent et favorisent une production primaire plus importante. De plus les textures argileux-limoneux favorisent le stockage de MO.

V.5. Conclusions sur la zone d'El Palqui

Les teneurs en COT sont proches des valeurs de Flor del Norte. Ils enregistrent aussi une diminution dans les 30 premiers cm de profondeur.

Les teneurs moyennes en COT (et les stocks de carbone) du sol diminuent de manière régulièrement croissante avec la profondeur.

Les faibles valeurs de IH et les valeurs de IO assez élevées enregistrées dès la surface du sol indiquent une MO d'emblée très dégradée.

VI. Évolution quantitative et qualitative de la matière organique de la zone de San Pedro de Pichasca

VI.1. Généralités

Le bassin de San Pedro de Pichasca se trouve à 36,7 km au nord-est de la ville d'Ovalle, province de Limarí, région de Coquimbo (30°24' S ; 70°53' W).

L'échantillonnage a porté sur trois secteurs de mode d'usage différent : (a) le secteur sans usage correspond à une parcelle d'une réserve naturelle appartenant au service forestier chilien (CONAF) depuis 1981, (b) un secteur sous usage extensif (ancienne prairie de luzerne abandonnée et (c) un secteur sous usage intensif (vignoble).

VI.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone de San Pedro de Pichasca et évolution dans les profils

Les profils des sols de cette zone montrent des valeurs de MO plus importantes que pour le reste de la séquence altitudinale, avec un écart important entre le secteur préservé et ceux sous usages extensif et intensif. En effet les valeurs varient de 0,31 à 2,18 g·kg⁻¹ pour le secteur sans usage, de 1,01 à 21,22 g·kg⁻¹ pour l'usage extensif et de 0,8 à 17,22 g·kg⁻¹ dans le secteur sous usage intensif (tableau 5.18).

Tableau 5.18. Données quantitatives (COT, stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de trois secteurs sous trois modes d'usage différents à San Pedro de Pichasca.

Profondeur (cm)	COT (g×kg ⁻¹)	Stock de C (Mg×ha ⁻¹)	S ₂ (mg HC×g ⁻¹ sol)	IH (mg HC×g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ ×g ⁻¹ COT)
Secteur sans usage					
0 - 5	2,18	1,95	0,31	134	380
5 - 10	1,31	1,17	0,17	134	506
10 - 20	0,81	1,45	0,09	119	645
20 - 30	0,69	1,24	0,08	120	746
30 - 40	0,61	1,08	0,08	139	754
40 - 50	0,45	0,77	0,07	173	1258
50 - 60	0,38	0,67	0,06	171	1248
60 - 70	0,35	0,63	0,05	156	1233
70 - 80	0,23	0,41	0,04	187	1475
80 - 90	0,29	0,51	0,05	170	1123
90 - 100	0,31	0,55	0,05	138	1014
Secteur à usage extensif (prairie à l'abandon)					
0 - 5	27,57	21,22	6,92	251	238
5 - 10	11,07	8,48	1,53	136	284
10 - 20	4,49	6,89	0,46	100	354
20 - 30	5,20	7,91	0,37	81	557
30 - 40	4,40	6,68	0,74	161	511
40 - 50	1,26	1,92	0,26	204	925
50 - 60	0,77	1,19	3,29	208	775
60 - 70	1,28	1,98	0,68	148	651
70 - 80	0,68	1,06	0,23	143	844
80 - 90	0,65	1,01	0,18	145	899
90 - 100	-	-	-	-	-
Secteur à usage intensif (vignoble depuis 10 mois)					
0 - 5	21,82	17,22	5,94	271	218
5 - 10	11,35	9,47	2,08	183	231
10 - 20	6,89	11,49	0,90	129	260
20 - 30	5,41	9,26	0,65	119	270
30 - 40	2,64	4,66	0,30	126	482
40 - 50	1,74	2,87	0,20	121	614
50 - 60	1,78	2,85	0,29	164	522
60 - 70	0,71	1,20	0,10	151	1516
70 - 80	0,87	1,44	0,23	182	1607
80 - 90	1,00	1,72	0,28	187	890
90 - 100	0,53	0,80	0,18	259	1140

La situation des profils sous usage extensif et intensif reste plutôt proche du profil d'El Palqui, c'est-à-dire des profils avec des contenus en MO plus importants, et une distribution

en profondeur plus équilibrée. Cependant le secteur protégé présente des valeurs extrêmement faibles avec une variation très légère entre la surface et la profondeur.

VI.3. Qualité de la matière organique

Les valeurs d'IH restent relativement faibles comme partout ailleurs. Cependant les différences entre la surface et la profondeur restent plus discrètes. Le degré de dégradation reste très important pour le profil du secteur préservé avec des valeurs des valeurs de IH très faibles comprises entre 134 et 187 mg HC·g⁻¹ de COT. En revanche, la MO des sols des secteurs sous usage extensif et intensif s'avère beaucoup moins altérée, avec en surface des valeurs de IH qui se situent autour de 260 mg HC·g⁻¹ de COT.

L'analyse des diagrammes S₂ vs COT (figure 6) met en évidence la différence des taux de minéralisation de la MO entre le secteur préservé et les secteurs sous usage extensif et intensif respectivement. En premier lieu, grâce à l'échelle nous pouvons voir une nette différence des valeurs du S₂ et du COT, entre le secteur préservé (faibles valeurs) et les secteurs exploités. La valeur moyenne d'IH obtenue à partir de la pente ($\delta S_2 \cdot \delta COT^{-1}$) de la droite du graphique du secteur sans usage (IH = 135 mg HC·g⁻¹ de COT) met en évidence la présence d'une MO dégradée tout au long du profil. Sur le graphique du secteur sous usage extensif, on peut noter une pente négative ($\delta S_2 \cdot \delta COT^{-1}$) pour les valeurs de COT comprises entre 0 et 4,68 g·kg⁻¹ (entre 0-30 cm), puis une pente positive au-delà de 30 cm. Ceci correspond bien à une diminution de l'IH sur les 30 premiers cm puis à une augmentation. Toutefois que ce soit dans le secteur sous usage extensif ou le secteur sous usage intensif, on peut décrire une tendance générale à l'augmentation des valeurs en S₂ et COT. Cette évolution est en accord avec une tendance croissante des taux de minéralisation avec la profondeur.

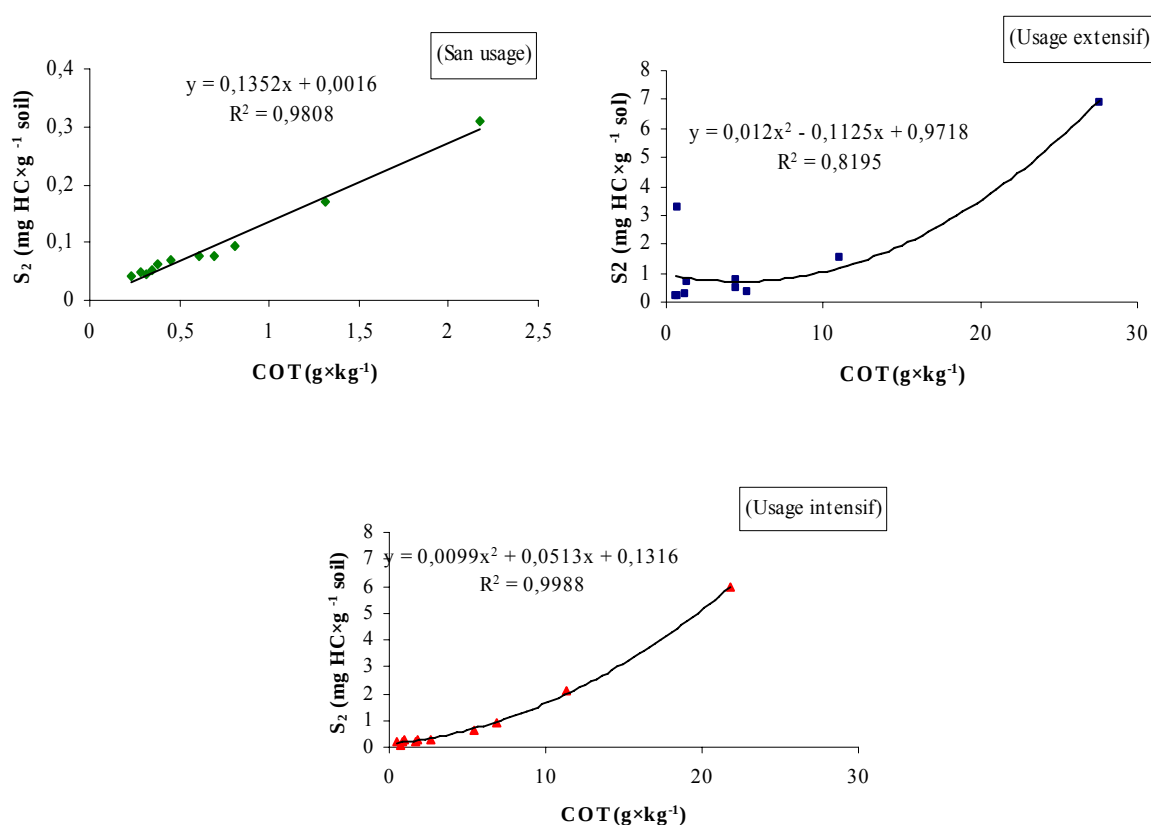


Figure 5.6. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de San Pedro de Pichasca.

Les valeurs de l'indice IO, témoignent toujours d'une certaine dégradation de la MO. Sur les trois secteurs, on observe une augmentation des valeurs d'IO avec la profondeur. De plus, une nette augmentation des IO est à noter, vers 40-50 cm dans le secteur préservé et celui sous usage extensif, et vers 60-70 cm pour le secteur sous usage intensif.

La tendance générale des valeurs de R400 est une croissance avec des valeurs supérieures pour le secteur sans usage. Dès la surface, les valeurs observées sur les trois secteurs sont proches. Sur cette zone d'étude, le niveau d'altération de la MO en profondeur reste toujours conséquent.

Tableau 5.19. Proportion de carbone labile libérée entre 200 et 400°C (R400) pour la zone de San Pedro de Pichasca.

Profondeur (cm)	R400 Sans usage	R400 Usage extensif	R400 Usage intensif
0 - 5	0,32	0,29	0,34
5 - 10	0,35	0,25	0,29
10 - 20	0,40	0,29	0,29
20 - 30	0,41	0,30	0,31
30 - 40	0,43	0,29	0,34
40 - 50	0,45	0,34	0,36
50 - 60	0,47	0,36	0,36
60 - 70	0,47	0,31	0,45
70 - 80	0,49	0,35	0,43
80 - 90	0,50	0,37	0,46
90 - 100	0,48	-	0,46

VI.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

Comme nous l'avons signalé dans le paragraphe précédent, les valeurs d'IH diminuent sur les 30 premiers cm puis augmentent. Cependant, on observe des valeurs relativement homogènes pour le secteur sans usage, ce qui peut être expliqué par des conditions d'altitude (~900 m) proches de la haute montagne et donc une action négative de la température sur la dégradation de la MO.

Les valeurs des IO du sol du secteur sans usage sont plus élevées sur l'ensemble du profil, en comparaison avec les secteurs exploités. De plus, plus l'usage est important plus les valeurs en IO augmentent avec la profondeur. Comme pour la zone Flor del Norte, ceci peut s'expliquer par la forte décroissance des stocks de carbone, faisant ainsi augmenter les valeurs de cet indice.

Les stocks de carbone sont d'autant plus élevés que l'usage est important, ce qui exprime immédiatement l'impact de la production végétale sur le stock de carbone du sol. Ainsi, les proportions des stocks de C comprises entre 0-30 et 30-100 cm sont nettement différentes entre le secteur sans usage (quotient de 1,4) et les secteurs exploités (quotient de 3,2). Dans le secteur sans usage, la valeur relativement faible de ce quotient (1,4) nous indique un certain équilibre entre la surface et la profondeur (tableau 5.20). En revanche, en

ce qui concerne les secteurs exploités, quelque soit l'usage du sol, les $\frac{3}{4}$ du stock de carbone demeure concentrés dans les 30 premiers cm. Ainsi, en plus de la très forte augmentation des stocks de carbone entre le secteur préservé et les secteurs exploités (facteur 6), on observe un fort déséquilibre entre la surface et la profondeur, probablement lié d'une part à un apport en MO dû aux cultures, mais d'autre part aussi à un effet climatique. En effet, des températures plus basses peuvent accentuer ce déséquilibre par une plus faible dégradation de la MO en surface et donc une concentration relative de cette dernière.

Tableau 5.20. Carbone organique total (COT) sous les trois modes d'usage pour la zone de San Pedro de Pichasca. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

*Proportion par rapport au stock de carbone organique total du secteur préservé.

	Stock de carbone organique (Mg·ha ⁻¹)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur sans usage	10,43	5,81 (56 %)	4,07 (39 %)	1,4
Secteur usage extensif	58,34 (604 %)*	44,50 (76 %)	13,84 (24 %)	3,2
Secteur usage intensif	62,98 (559 %)*	47,44 (75 %)	14,74 (23 %)	3,2

VI.5. Conclusions sur la zone de San Pedro de Pichasca

Les teneurs en COT qui sont globalement faibles dans les 3 secteurs d'étude, enregistrent aussi une forte diminution dans les 30 premiers cm des profils.

Les faibles valeurs de IH et les valeurs de IO assez élevées enregistrées dès la surface du sol indiquent une MO d'emblée très dégradée.

Les teneurs et stock de MO présentent un comportement inverse à ceux trouvés dans les autres sites : les teneurs moyennes en COT (et les stocks de carbone) du sol augmentent avec l'intensité croissante de l'exploitation du territoire. Ceci indique un stockage dans le sol, et plus particulièrement dans sa partie supérieure, d'une part de la production végétale.

VII.Évolution quantitative et qualitative de la matière organique de la zone de Las Ramadas

VII.1. Généralités

La zone de Las Ramadas se trouve à 76,2 km au sud-est de la ville d'Ovalle, province de Limarí, région de Coquimbo (30°12' S ; 70°34' W).

L'échantillonnage a été fait sur trois modes d'usage : (a) le secteur sans usage, (b) un secteur sous usage extensif (plantation de noyer de 9 mois et (c) un secteur sous usage intensif (noyers de 4 et 8 ans).

VII.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone de Las Ramadas et évolution dans les profils

Les profils de sols de cette zone montrent les valeurs de MO les plus importantes de toute la séquence altitudinale choisie et ce quelque soit l'usage. En effet, les valeurs varient de 3,38 à 57,8 g·kg⁻¹ pour le secteur sans usage, de 1,99 à 19 g·kg⁻¹ pour l'usage extensif et de 2,72 à 62,84 g·kg⁻¹ dans le secteur sous usage intensif (tableau 5.21).

Tableau 5.21. Données quantitatives (COT, stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de trois secteurs sous trois modes d'usage différents à Las Ramadas.

Profondeur (cm)	COT (g×kg ⁻¹)	Stock de C (Mg×ha ⁻¹)	S ₂ (mg HC×g ⁻¹ sol)	IH (mg HC×g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ ×g ⁻¹ COT)
Secteur sans usage					
0 - 5	57,80	36,54	19,34	333	168
5 - 10	37,14	23,15	9,89	263	189
10 - 20	23,13	29,69	4,57	197	209
20 - 30	15,87	20,84	2,59	164	220
30 - 40	8,19	11,75	0,87	110	313
40 - 50	7,76	11,55	1,01	128	323
50 - 60	10,12	10,36	1,36	129	311
60 - 70	4,93	5,42	0,67	135	369
70 - 80	5,76	6,16	0,80	137	354
80 - 90	3,38	3,65	0,45	133	455
90 - 100	10,13	9,62	1,82	180	241
Secteur à usage extensif (noyers de 9 mois)					
0 - 5	18,14	11,85	11,24	182	281
5 - 10	19,00	12,50	6,59	182	268
10 - 20	15,12	20,13	3,75	169	277
20 - 30	10,25	13,73	2,10	140	316
30 - 40	8,49	11,42	1,10	120	334
40 - 50	5,43	7,75	0,89	116	478
50 - 60	4,11	5,97	1,22	107	567
60 - 70	3,28	4,77	0,50	95	631
70 - 80	2,89	4,69	0,66	92	629
80 - 90	2,16	2,54	0,40	128	702
90 - 100	1,99	3,48	1,82	109	742
Secteur à usage intensif (noyers de 8 ans)					
0 - 5	62,84	40,92	22,92	356	139
5 - 10	23,71	22,73	5,36	226	167
10 - 20	15,73	22,63	2,91	181	185
20 - 30	10,76	15,89	1,72	179	215
30 - 40	9,52	14,04	1,27	317	279
40 - 50	9,65	14,25	1,13	296	254
50 - 60	10,57	15,64	1,07	216	338
60 - 70	7,32	10,62	0,77	162	241
70 - 80	6,34	8,39	0,62	123	221
80 - 90	5,65	7,89	0,66	227	385
90 - 100	2,72	3,76	0,36	175	364

Les profils de carbone indiquent le même comportement que dans les zones déjà analysées : un apport essentiel de MO au sol *via* les parties aériennes des végétaux, puis une dégradation progressive de ce matériel en profondeur.

Les fortes teneurs en carbone des sols de cette zone de Las Ramadas, les plus élevées, de l'ensemble des zones étudiées, peuvent s'expliquer par le fait que l'on se situe au niveau de la Cordillère où les précipitations plus abondantes (neige et pluie, ~172 mm/an), associées à une altitude élevée et des températures plus fraîches (1500 m - ~15°C), permettent le développement et la pérennisation d'une couverture végétale particulière, responsable de forts apports en carbone, mais aussi d'un ralentissement de la dégradation de la MO.

VII.3. Qualité de la matière organique

Sur l'ensemble des secteurs étudiés, les valeurs d'IH diminuent fortement dans les 30 premiers cm, puis plus lentement en profondeur.

Si l'on compare ces valeurs d'IH avec celles des autres zones d'études, on note qu'elles sont supérieures et cela est notamment plus flagrant en surface. Ceci confirme les arguments évoqués précédemment, i.e. une plus faible dégradation de la MO dans cette zone.

Les diagrammes S_2 vs COT de la Figure 5.7 montrent que les points de données s'alignent selon une courbe. On remarque que sur l'ensemble des profils, l'altération de la MO semble être plus importante en profondeur qu'en surface. En effet, ceci se corrèle à la diminution générale des IH en profondeur mais également à celle des COT.

Globalement les valeurs d'IO sont plus faibles dans cette zone : 196 mg de $\text{CO}_2 \times \text{g}^{-1}$ de COT en surface et 449 mg de $\text{CO}_2 \times \text{g}^{-1}$ de COT en profondeur. Ces valeurs basses sont voisines de celles observées dans la zone de Camarico. Ici encore, les évolutions inverses du COT et de l'IO en fonction de la profondeur, nous indiquent une augmentation des teneurs en groupements oxygénés de la MO en parallèle à sa minéralisation progressive.

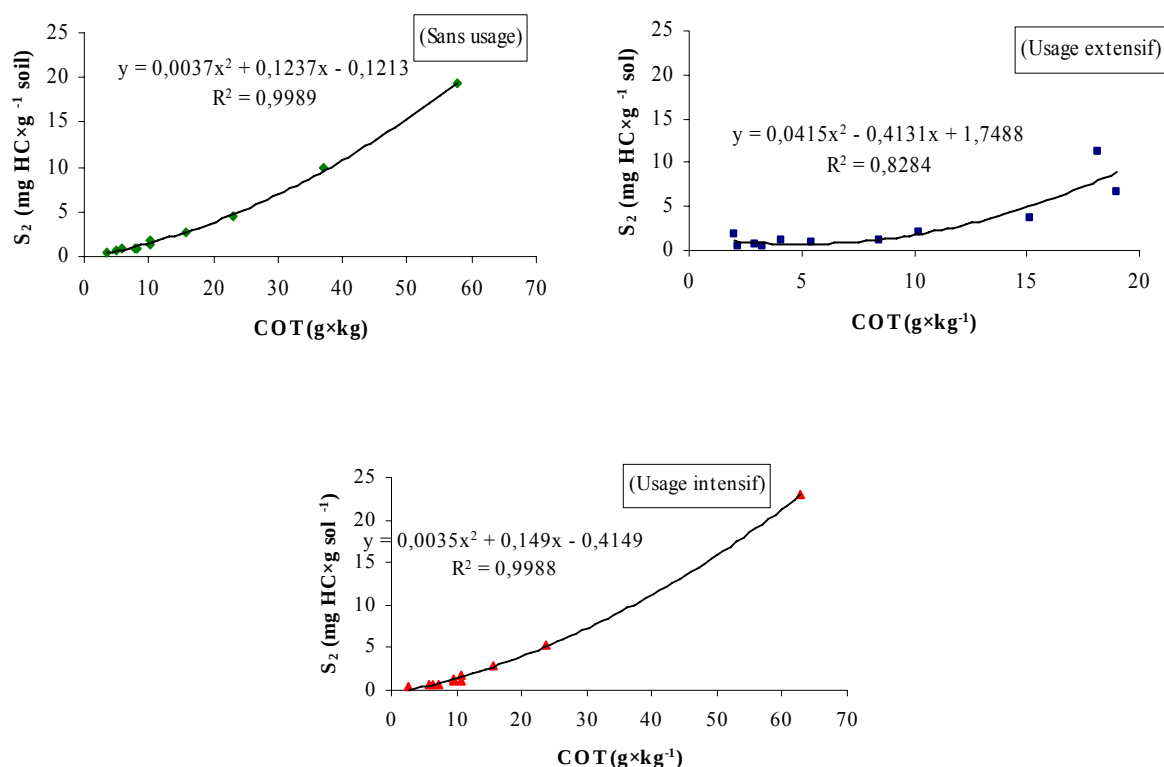


Figure 5.7. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de Las Ramadas.

Les R400 de la zone de Las Ramadas évoluent de manière opposée à toutes les autres zones d'étude. En effet, il existe une diminution en surface puis une stabilisation des valeurs de R400 en profondeur. Il existerait donc une diminution de la part de MO labile à la base du profil. Les études sur différents types de sols dans plusieurs pays (podzol au Canada, andosol en France, cambisol en Grande-Bretagne, ...) menées par Disnar *et al.*, (2003) montrent une décroissance des R400 associée à une diminution des COT et de l'IH, comme dans notre cas. Ces auteurs expliquent cette évolution par un changement de la structure de la MO, du fait de la formation de composés humiques à partir de biopolymères (tableau 5.22).

Tableau 5.22. Proportion de carbone labile libérée entre 200 et 400°C (R400) pour la zone de Las Ramadas.

Profondeur (cm)	R400 Sans usage	R400 Usage extensif	R400 Usage intensif
0 - 5	0,48	0,37	0,45
5 - 10	0,44	0,36	0,37
10 - 20	0,40	0,36	0,36
20 - 30	0,37	0,36	0,36
30 - 40	0,36	0,35	0,32
40 - 50	0,35	0,37	0,30
50 - 60	0,37	0,37	0,33
60 - 70	0,36	0,38	0,32
70 - 80	0,37	0,37	0,31
80 - 90	0,38	0,34	0,33
90 - 100	0,33	0,35	0,34

VII.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

Les valeurs d'IH sont proches pour les conditions sans usage et usage intensif. On observe une diminution sur les 30 à 40 premiers cm puis à une réaugmentation. Sur le secteur sous usage extensif la diminution de l'IH se fait sur les 80 premiers cm.

Pour le secteur sous usage extensif les valeurs d'IO sont plus élevées sur l'ensemble du profil que dans les secteurs sans usage et sous usage intensif. Ceci peut s'expliquer par la forte décroissance des stocks de carbone sous ce mode d'usage, faisant ainsi augmenter les valeurs de cet indice.

Au contraire des autres zones déjà analysées on ne peut pas établir une relation claire entre l'effet de l'usage et les stocks de carbone, la condition sous usage intensif étant la plus riche (176 Mg·ha⁻¹), suivie de la condition sans usage (163,9 Mg·ha⁻¹), puis de la condition sous usage extensif (98,8 Mg·ha⁻¹). Les proportions des stocks entre 0-30 et 30-100 cm sont nettement différentes entre le secteur sans usage (2,1) et les secteurs sous usage extensif et intensif (1,4). Contrairement à toutes les autres zones échantillonnées tout au long de notre transect régional, les proportions des stocks entre 0-30 et 30-100 cm pour les secteurs sous usage extensif et intensif présentent une meilleure répartition de stocks entre la surface et la profondeur par rapport à la situation sans usage (tableau 5.23). Cela peut s'expliquer

partiellement par la position topographique des profils du secteur sans usage. En effet, ces profils sont proches du sommet de la montagne où les horizons A, E et B sont presque inexistantes, favorisant en surface et en profondeur les ruissellements qu'entraînent les précipitations.

Tableau 5.23. Carbone organique total (COT) sous les trois modes d'usage pour la zone de Las Ramadas. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

*Proportion par rapport au stock de carbone organique total du secteur préservé.

	Stock de carbone organique (Mg·ha ⁻¹)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur sans usage	163,9	110,2 (67 %)	53,7 (33 %)	2,1
Secteur usage extensif	98,8 (60 %)*	58,2 (59 %)	40,6 (41 %)	1,4
Secteur usage intensif	176,8 (108 %)*	102,2 (58 %)	74,6 (42 %)	1,4

VII.5. Conclusions sur la zone de Las Ramadas

Les teneurs en COT sont relativement importantes quelque soit l'usage du sol, mais on ne peut pas établir de relation directe entre les teneurs et stocks de MO et l'usage des sols.

Les valeurs élevées en S₂ et la distribution en profondeur des R400, IH et IO montrent une MO moins dégradée que dans les autres sites analysés.

VIII. Conclusions générales

Globalement les teneurs et stocks de MO augmentent régionalement selon un axe ouest-est. Ce comportement va dans le même sens qu'une augmentation des altitudes et des précipitations moyennes, à l'opposé des températures moyennes.

Les teneurs et stocks de MO du sol dépendent de la position sur cet axe ouest-est, en fonction de l'intensité de l'usage des terres. Les zones plus proches de la côte, à de plus basses altitudes, avec des précipitations moyennes inférieures et des températures plus élevées, présentent un comportement inversement proportionnel à l'intensité de l'usage (Las Cardas, Talhuén), i.e. un stock maximal pour les secteurs sans usage. Pour les zones situées en moyenne et haute montagne le comportement s'inverse (Pichasca, Las Ramadas) : un stock maximal pour les secteurs sous culture intensive. De plus le type d'usage de Las Cardas (pâturages) accentue encore plus les conséquences de l'intensité de l'usage : le pâturage étant une activité plutôt extractive de MO, où les apports en surface sont marginaux (excréments) et les apports racinaires inexistant.

Par ailleurs, le rapport des stocks entre 0-30 et 30-100 cm s'accroît avec l'intensité de l'usage : on a ainsi un déséquilibre accru dont les valeurs sont plus élevées en surface qu'en profondeur.

Les IH présentent une légère croissance d'ouest en est : ils sont directement proportionnels à l'altitude et inversement proportionnels aux précipitations et aux températures. On constate donc que le niveau de dégradation de la MO diminue d'est en ouest, et qu'il se corrèle avec la température et la précipitation. Par ailleurs, les IH augmentent également en fonction de l'intensité de l'usage du sol et ce quelque soit la position sur le transect ouest-est. On en conclut que l'usage quel qu'il soit : pâturages ou culture (noyers, vignes, artichauts) ralentit la dégradation de la MO.

Les valeurs d'IH qui sont faibles en surface et qui diminuent avec la profondeur quelque soit la zone et l'intensité de l'usage révèlent une MO d'emblée très dégradée, avec un taux de dégradation qui s'accroît encore en profondeur.

La diminution globale des IO d'ouest vers l'est marque plutôt un accroissement de la qualité de la MO, i.e vraisemblablement d'une combinaison d'un accroissement de sa production et d'un ralentissement de sa dégradation dans les sols.

A proximité de la côte les valeurs d'IO sont proportionnelles à l'intensité de l'usage, le phénomène tend à s'inverser vers l'est. On constate que les phénomènes d'oxydation et donc de dégradation de la matière organique sont plus sensibles à l'usage lorsque la température moyenne augmente. Au contraire, vers la cordillère, le comportement s'inverse : la dégradation de la MO se ralentit en fonction de l'intensité de l'usage, c'est-à-dire ici plus précisément de la mise en culture.

Les R400 croissant généralement avec la profondeur. Cette croissance semble s'atténuer, voir disparaître vers l'est du transect (Pichasca et Las Ramadas). On en conclut que les proportions de MO labile entre la surface et la profondeur tendent à s'équilibrer au fur et à mesure que l'on monte en altitude avec l'augmentation des précipitations moyennes et la décroissance des températures.

L'ensemble de ces observations et notamment celles qui concernent la diminution des stocks de carbone et leur répartition au sein des profils de sols, dans des secteurs dont la mise en exploitation ne date que de quelques décennies, implique une très forte dynamique de la MO, ce qui semble de prime abord étonnant dans une région semi-aride et où les grands agents habituels du recyclage du carbone organiques tels que lombrics et/ou termites, semblent absents.

CHAPITRE VI

MODELISATION DES STOCKS DE CARBONE

Dans le but de mieux caractériser le comportement de la matière organique et l'impact de l'usage, nous avons modélisé les stocks de carbone en profondeur de trois zones de la région de Coquimbo sur le transect ouest-est préalablement décrit. Nous avons également modélisé les stocks entre 0-30 cm et leur relation avec les stocks de 0 – 100 cm.

À ce sujet, le secteur de Las Cardas a fait l'objet d'une publication soumise et acceptée (actuellement en correction) qui est mise en annexe.

I. Méthode de calcul des stocks de carbone

Pour rappel, les équations du calcul des stocks :

Pour une couche de profil :

$$SCOT = 100 \times E_i \times COT_i \times D_{ai} \times EG_i \text{ où :}$$

E_i = épaisseur de la couche

COT_i = carbone organique totale en $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

D_{ai} = densité apparente de la couche en $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$

EG_i = proportion en éléments grossiers ($> 2 \text{ mm}$)

Pour la totalité du profil, nous avons déterminé le $SCOT_s$ (stock du profil du sol) au moyen de l'équation suivante :

$$SCOT_s = 100 \times \sum_n (E_i \times COT_i \times D_{ai} \times EG_i)$$

Les résultats des calculs des stocks de carbone en fonction de l'usage sont discutés dans le Chapitre V. Une analyse complémentaire des moyennes au moyen du test de Fisher a été réalisé dans le but de déterminer des différences statistiquement significatives entre les moyennes des stocks de carbone par mode d'usage de 0 à 100 cm ($SCOT_s$), de 0 à 30 cm ($SCOT_{30}$) et de 70 à 100 cm de profondeur ($SCOT_{70}$).

II. Modélisation des rapports surface-profondeur stocks de carbone

Dans le but de tester le comportement des stocks dans les 30 premiers cm par rapport au stock à 100 cm avec un modèle de régression simple, nous avons établi la droite de régression entre ces deux stocks, toutes conditions d'usage confondues.

Afin de discuter la validité (e.g. Wösten *et al.*, 2001; Schaap, 2004) de ce comportement nous avons calculé l'erreur quadratique moyenne (EQM)

$$EQM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (SCOT_{p,i} - SCOT_{m,i})^2 \right]^{1/2}$$

où $SCOT_{p,i}$ correspond au stock prédi du profil i , $SCOT_{m,i}$ est le stock mesuré du profil i . L'EQM varie à la fois avec le biais et la précision de l'estimation (Grais, 2003 ; García, 2004). Pour déterminer indépendamment ces derniers nous avons calculé l'erreur moyenne de l'estimation (EME) et sa déviation standard (DSE) (Bruand *et al.*, 2003) :

$$EME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (SCOT_{p,i} - SCOT_{m,i})$$

$$DSE = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} [(SCOT_{p,i} - SCOT_{m,i}) - EME]^2 \right\}^{1/2}$$

L'EME mesure le biais et indique les stocks surestimés (positive) ou sous-estimés (négative) alors que la DSE mesure la précision de l'estimation.

III. Stock de carbone de la zone de Las Cardas

III.1. Distribution du carbone organique total COT_s et des stocks de carbone organique total ($SCOT_s$) en profondeur

La distribution des COT_s en profondeur pour chaque profil et chaque mode d'usage peut être appréciée dans la figure 6.1. La distribution des $SCOT_s$ moyens pour chaque mode d'usage est représentée dans la figure 6.2. Les $SCOT_s$ varient entre 31,1 et 42,6 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sans usage, de 24,3 à 29,3 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour le secteur sous usage extensif et de 10,2 à 15,5 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la situation sous usage intensif (tableau 6.1). Les valeurs du secteur sans

usage sont proches des valeurs trouvées pour des écosystèmes semi-arides de la zone centrale de l'Espagne (Hernandez *et al.*, 2002) et supérieures aux valeurs trouvées pour des écosystèmes semi-arides de Etats-Unis par Shrestha et Stahl (2008).

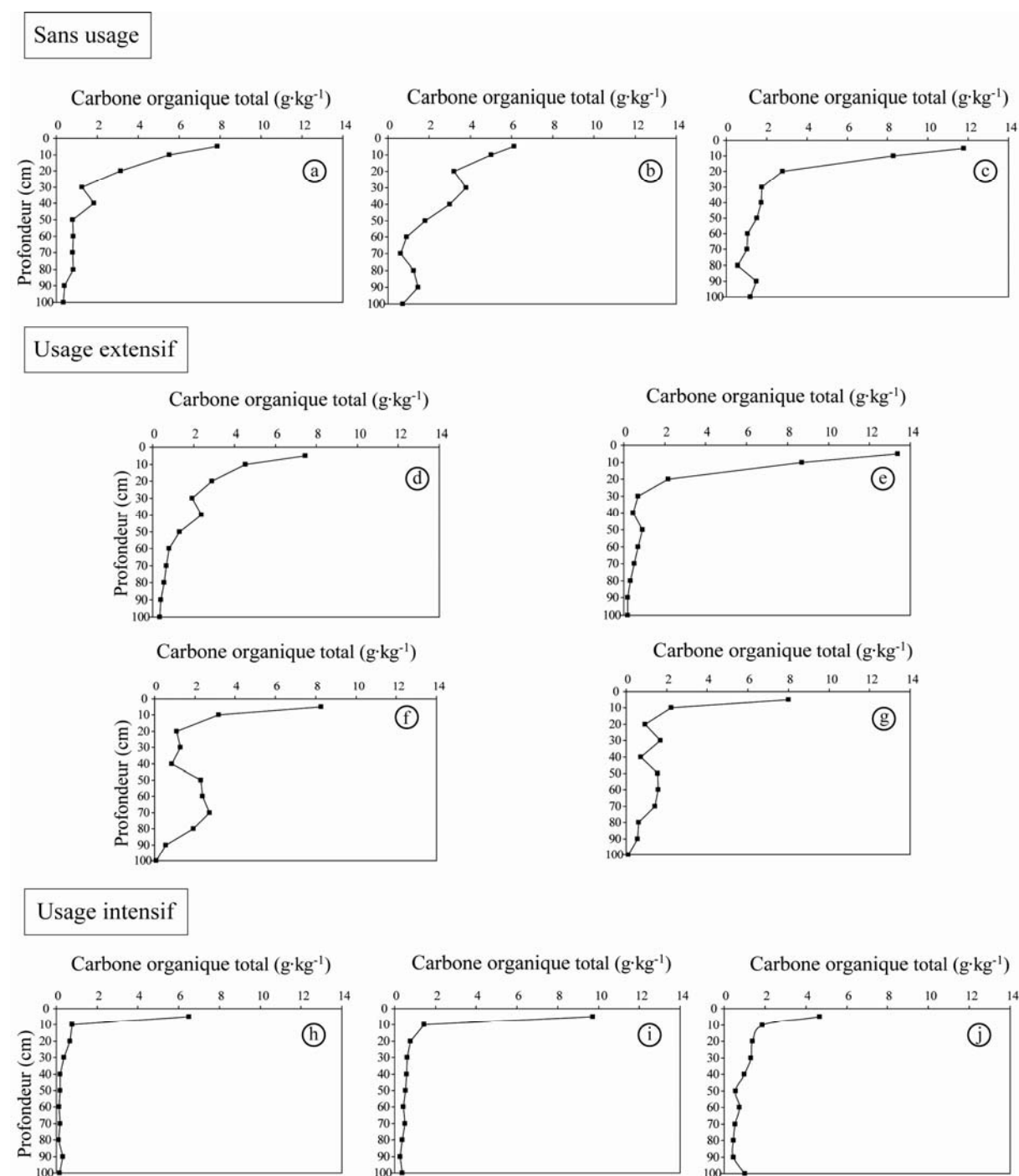


Figure 6.1. Distribution du carbone organique des profils (COTS) en profondeur pour chaque mode d'usage dans la zone de Las Cardas.

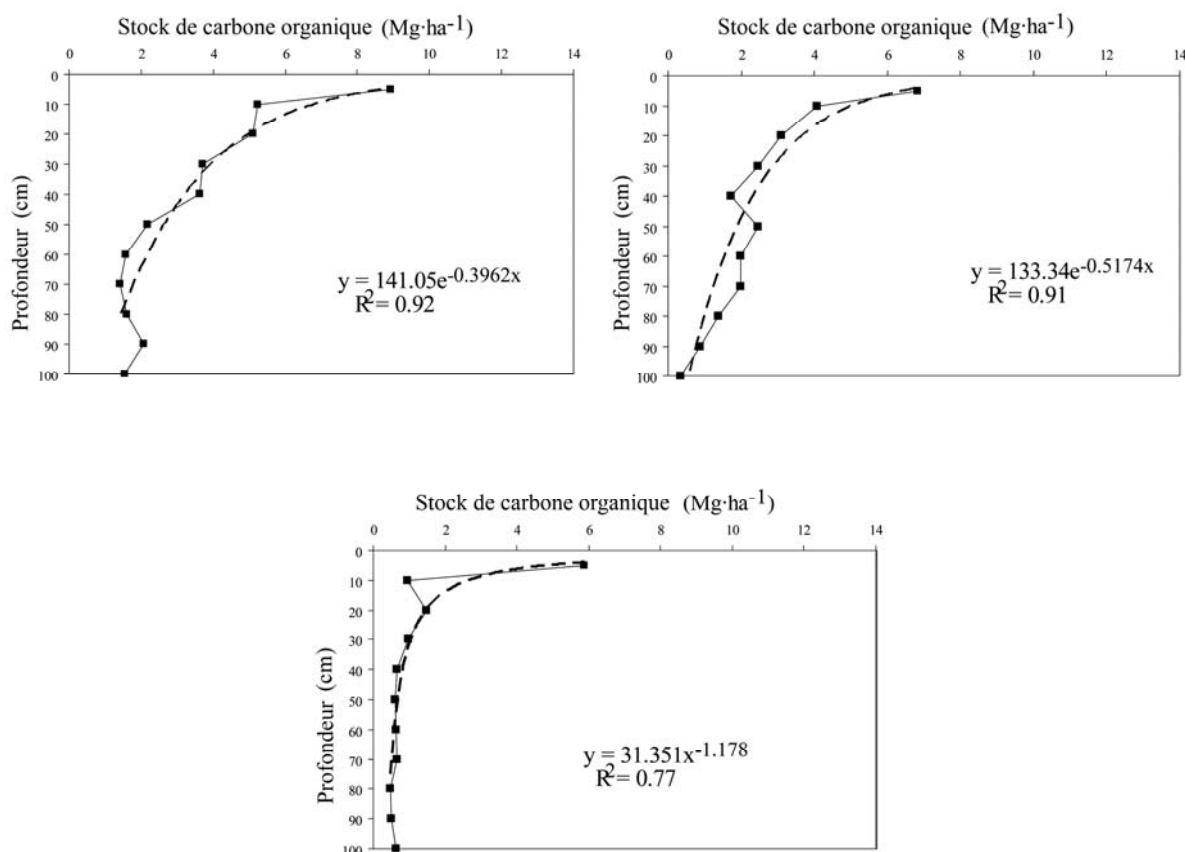


Figure 6.2. Distribution en profondeur des stocks de carbone organique totaux moyens par mode d'usage.

Tableau 6.1. Stock de carbone organique total (SCOT) sous les trois modes d'usage pour la zone de Las Cardas. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

*Proportion par rapport au stock de carbone organique total du secteur préservé.

	Stock de carbone organique total (Mg·ha ⁻¹)		
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm
Secteur sans usage			
Profil 1	31.1	19.4	11.7
Profil 2	42.6	26.3	16.2
Profil 3	37.7	23.3	14.4
Moyenne	37.1	23.0 (62 %)	14.1 (38 %)
Secteur usage extensif			
Profil 4	29.1	17.2	11.9
Profil 5	29.3	22.9	6.4
Profil 6	24.3	12.2	12.1
Profil 7	26.2	13.6	12.6
Moyenne	27.2 (73 %)*	16.5 (61 %)	10.7 (39 %)
Secteur usage intensif			
Profil 8	10.2	8.1	2.1
Profil 9	14.7	9.0	5.8
Profil 10	15.5	10.9	4.6
Moyenne	13.5 (36 %)*	9.3 (69 %)	4.2 (31 %)

L'analyse des valeurs de $SCOT_s$ au moyen du test de Fisher montre qu'il existe une différence statistiquement significative entre les trois situations d'usage ($P = 0,95$).

Le stock de carbone organique total à 30 cm ($SCOT_{30}$) varie de 19,4 à 26,3 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sans usage, de 12,2 à 22,9 $Mg \cdot ha^{-1}$ sous usage extensif et de 8,1 à 10,9 $Mg \cdot ha^{-1}$ sous usage intensif (tableau 6.1). L'analyse des moyennes par le test de Fisher montre des différences statistiquement significatives entre les trois types d'usage ($P = 0,95$).

Le stock de carbone organique total entre 30 et 100 cm ($SCOT_{70}$) varie entre 11,7 et 16,2 $Mg \cdot ha^{-1}$ dans le secteur sans usage, de 6,4 à 12,6 $Mg \cdot ha^{-1}$ sous usage extensif et entre 2,1 et 5,8 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sous usage intensif (tableau 6.1). L'analyse statistique des moyennes des $SCOT_{70}$ montre qu'il existe des différences statistiquement significatives entre la condition sans usage et l'usage extensif et intensif.

Si l'on regarde la distribution du carbone, on s'aperçoit que les proportions de ces stocks restent *a priori* identiques entre la partie superficielle du sol et la profondeur, et ce entre les secteurs sans usage et usage extensif, soit plus de 60% entre 0 et 30 cm dans les 2 cas. En revanche, la forte décroissance des stocks de carbone dans les sols des secteurs sous usage intensif s'accompagne d'une plus forte diminution relative dans la partie profonde du profil, qui tombe alors à 31%, celle de la partie superficielle s'élevant donc à près de 70 %. Ces résultats peuvent s'interpréter de la manière suivante : dans le secteur extensif, l'usage a pour résultat immédiat une diminution des restitutions végétales au sol. Ceci entraîne très certainement une réduction de la production végétale brute, ce qui se ressent au niveau racinaire (racines elles-mêmes, plus exsudats). Un équilibre semble déplacé mais cependant préservé entre production et apports superficiels/profonds. En revanche dans le secteur intensif, cet équilibre n'est vraisemblablement plus préservé et la végétation n'arrive plus à se renouveler.

III.2. Prédiction des $SCOT_s$

L'étude des SCOT nécessite généralement de creuser une fosse pour échantillonner le sol. L'utilisation d'une tarière étant le plus souvent impossible en raison de pourcentages élevés en éléments grossiers. Cela nous pousse à essayer d'établir une relation entre le SCOT en surface et celui du profil total (0-100 cm). Pour déterminer la profondeur minimale

représentative du sol, nous avons testé 20 et 30 cm. Les résultats montrent que la relation entre le $SCOT_{20}$ et le $SCOT_S$ ($R^2 = 0,76$) est moins bonne que celle entre le $SCOT_{30}$ et le $SCOT_S$ ($R^2 = 0,89$). Ces relations ont été démontrées par l'estimation des $SCOT_S$ sur les 10 profils déjà analysés. La comparaison entre les $SCOT_S$ mesurés et ceux estimés le montre clairement (figure 6.3).

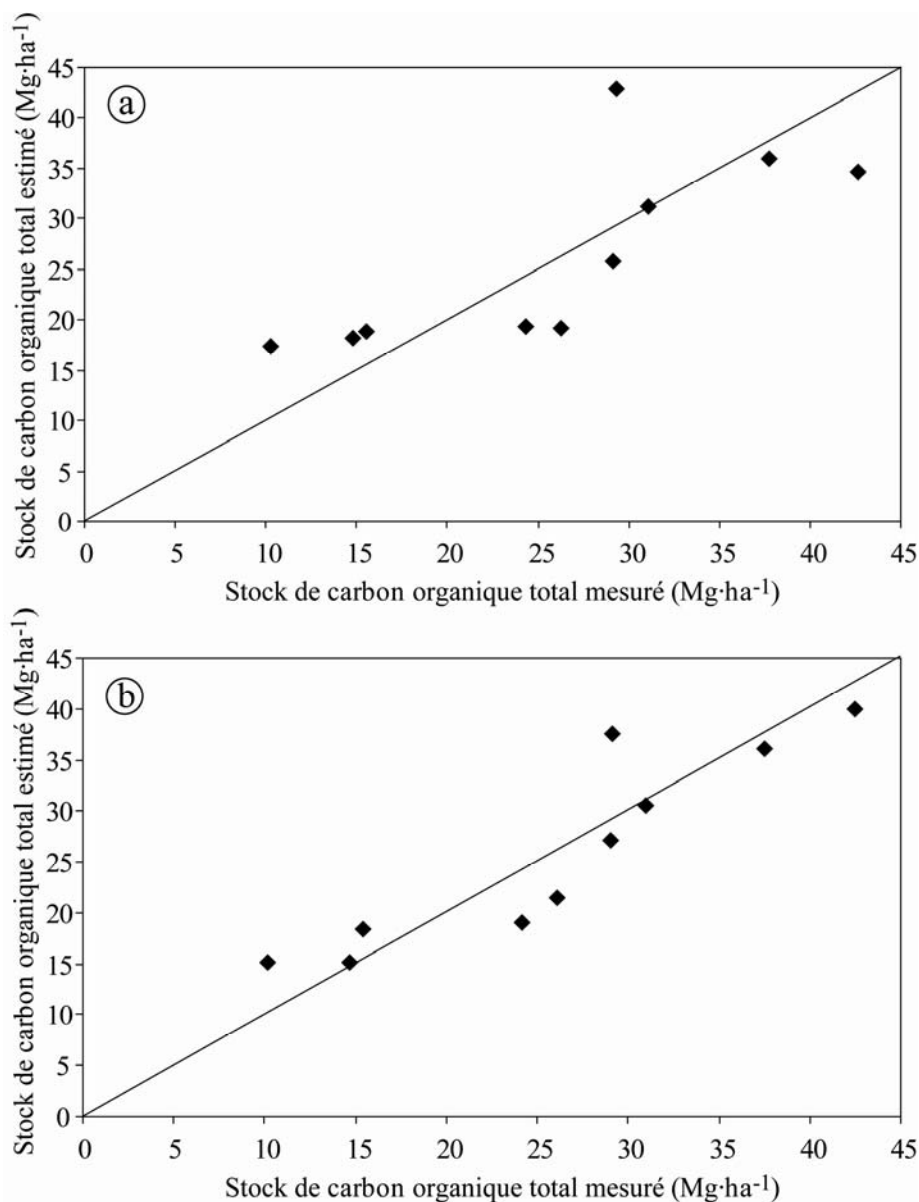


Figure 6.3. Relation entre les $SCOT_S$ mesurés et les $SCOT_S$ estimés pour a) 0-20 cm et b) 0-30 cm.

Le résultat de l'*EQM* pour le site de Las Cardas est de $5,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour l'épaisseur 0-20 cm et de $1,1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour 30 cm. L'estimation des *SCOT* est donc meilleure pour la profondeur de 30 cm. Les *SCOT*₃₀ ont été moins surestimés ($EME < 0,1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) que les *SCOT*₂₀ ($EME = 0,2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). De plus la précision est supérieure ($DSE = 3,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pour les *SCOT*₃₀ ($SCOT_{20} - DSE = 5,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

III.3. Conclusion des estimations à Las Cardas

L'ensemble de nos résultats montre que l'usage intensifie la décroissance du *SCOT*. Nous avons observé une différence significative entre les usages extensif et intensif et que ces derniers dépassent la capacité de charge de cet écosystème aride.

Nous avons ainsi pu estimer, avec une qualité relativement satisfaisante, le *SCOT* d'un sol en utilisant le *SCOT* de la surface 0-30 cm. Ceci permet de se soustraire à aux creusements des fosses, mais surtout d'augmenter le nombre de profils de sol étudié et donc la précision et l'échelle.

L'impact de l'intensité de l'usage sur le *SCOT* est observable sur la couche superficielle (0-30 cm) du sol. L'effet n'est pas quantifiable en profondeur (*SCOT*₇₀).

IV. Stock de carbone de la zone intermédiaire (Talhuén – Flor del Norte)

IV.1. Distribution du carbone organique total COT_s et des stocks de carbone organique total ($SCOT_s$) en profondeur

La distribution des COT_s en profondeur pour chaque profil et chaque mode d'usage peut être appréciée dans la figure 6.4. La distribution des $SCOT_s$ moyens pour chaque mode d'usage est représentée dans la figure 6.5 Les $SCOT_s$ varient entre 17,1 et 104,4 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sans usage, de 27,7 à 97,9 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour le secteur sous usage intensif (tableau 6.2). Lemenih et Itanna (2004) ont pu calculer également pour une zone proche au niveau climatique et végétation, des valeurs voisines de stocks variant entre 40 et 97 $Mg \cdot ha^{-1}$.

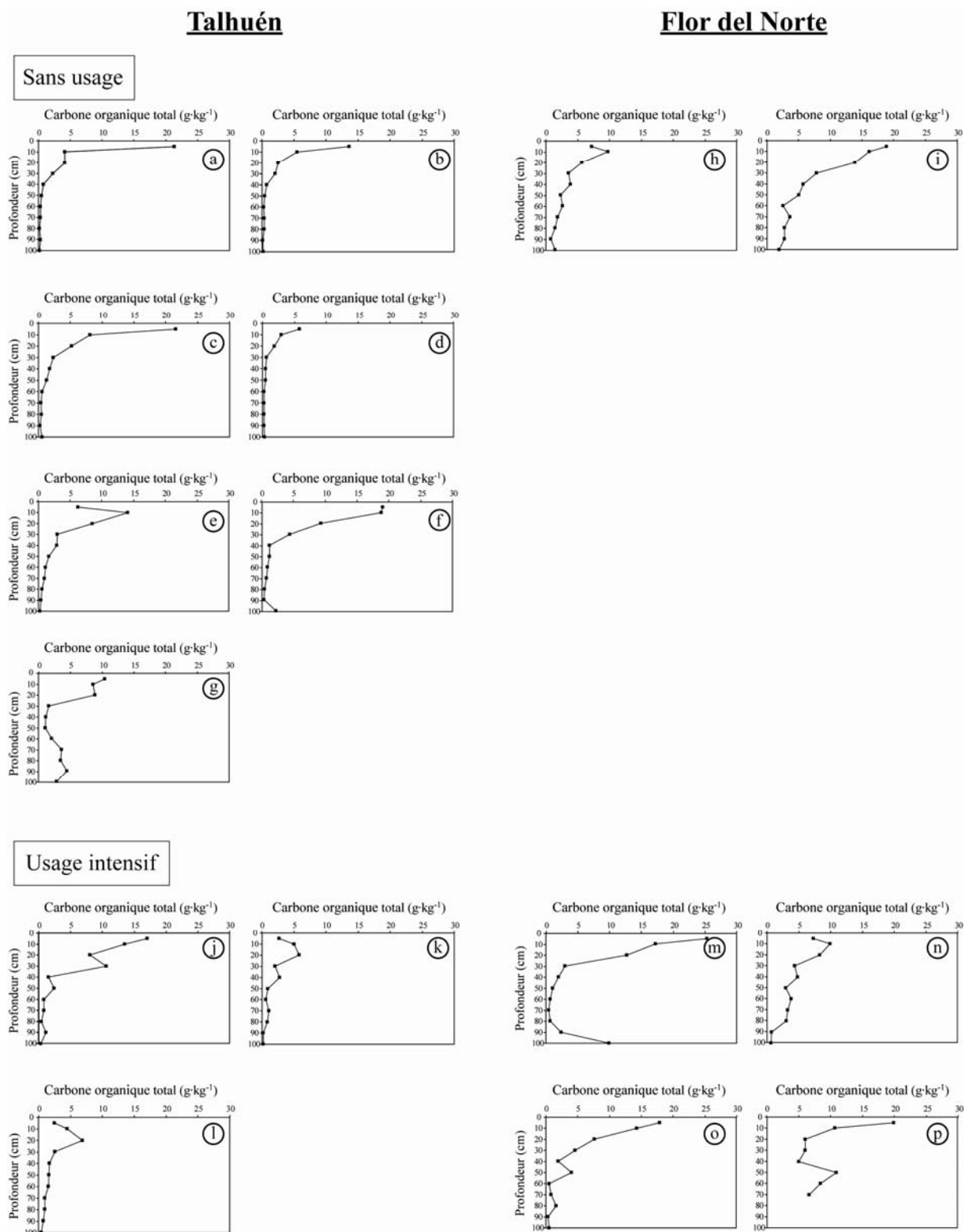


Figure 6.4. Distribution du carbone organique des profils (COT_s) en profondeur pour chaque mode d'usage dans la zone intermédiaire.

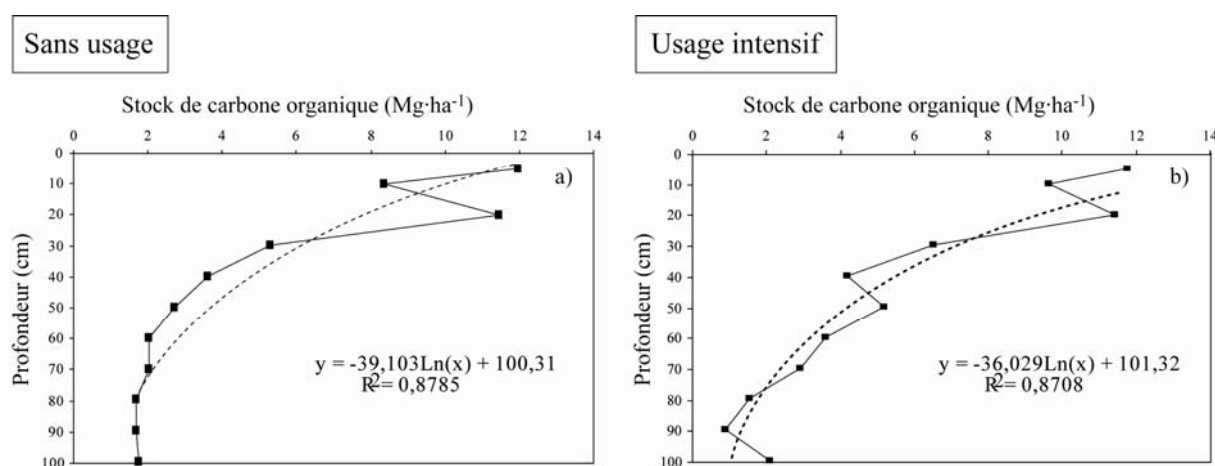


Figure 6.5. Distribution en profondeur des stocks de carbone organique totaux moyens par mode d'usage.

Tableau 6.2. Stock de carbone organique total (SCOT) sous les trois modes d'usage pour la zone intermédiaire. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

*Proportion par rapport au stock de carbone organique total du secteur préservé.

	Stock de carbone organique total (Mg·ha ⁻¹)		
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm
Secteur sans usage			
Profil 1	39,9	35,2	4,7
Profil 2	28,8	24,3	4,5
Profil 3	48,7	39,4	9,3
Profil 4	17,1	12,8	4,3
Profil 5	53,3	38,6	14,7
Profil 6	66,8	53,6	13,2
Profil 7	63,1	31,6	31,5
Profil 8	51,6	29,9	21,7
Profil 9	104,4	68,5	35,9
Moyenne	52,6	37,1 (71 %)	15,5 (29 %)
Secteur usage intensif			
Profil 10	56,7	49,3	7,4
Profil 11	22,7	15,7	7,0
Profil 12	24,1	16,3	7,8
Profil 13	85,8	63,7	22,0
Profil 14	66,9	35,7	31,2
Profil 15	64,8	48,9	16,0
Profil 16	97,9	36,9	61,8
Moyenne	59,8 (114 %)*	38,1 (63 %)	21,9 (37 %)

L'analyse des valeurs de $SCOT_s$ au moyen du test de Fisher montre qu'il n'existe pas une différence statistiquement significative entre les trois situations d'usage ($P = 0,95$).

Le stock de carbone organique total à 30 cm ($SCOT_{30}$) varie de 12,8 à 68,5 Mg·ha⁻¹ pour la condition sans usage, de 15,7 à 63,7 Mg·ha⁻¹ sous usage intensif (tableau 6.2).

L'analyse des moyennes par le test de Fisher montre qu'il n'existe pas des différences statistiquement significatives entre les deux types d'usage ($P = 0,95$).

Le stock de carbone organique total entre 30 et 100 cm ($SCOT_{70}$) varie entre 4,3 et 35,9 $Mg \cdot ha^{-1}$ dans le secteur sans usage, de 7,4 à 61,8 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sous usage intensif (tableau 6.2). L'analyse statistique des moyennes des $SCOT_{70}$ montre qu'il n'existe pas des différences statistiquement significatives entre la condition sans usage et l'usage extensif et intensif.

IV.2. Prédiction des $SCOT_S$

Les résultats montrent que la relation entre le $SCOT_{20}$ et le $SCOT_S$ ($R^2 = 0,6$) est moins bonne que celle entre le $SCOT_{30}$ et le $SCOT_S$ ($R^2 = 0,69$). Ces relations ont été démontrées par l'estimation des $SCOT_S$ sur les 16 profils analysés (Talhuén-Flor del Norte). La comparaison entre les $SCOT_S$ mesurés et ceux estimés le montre clairement (figure 6.6).

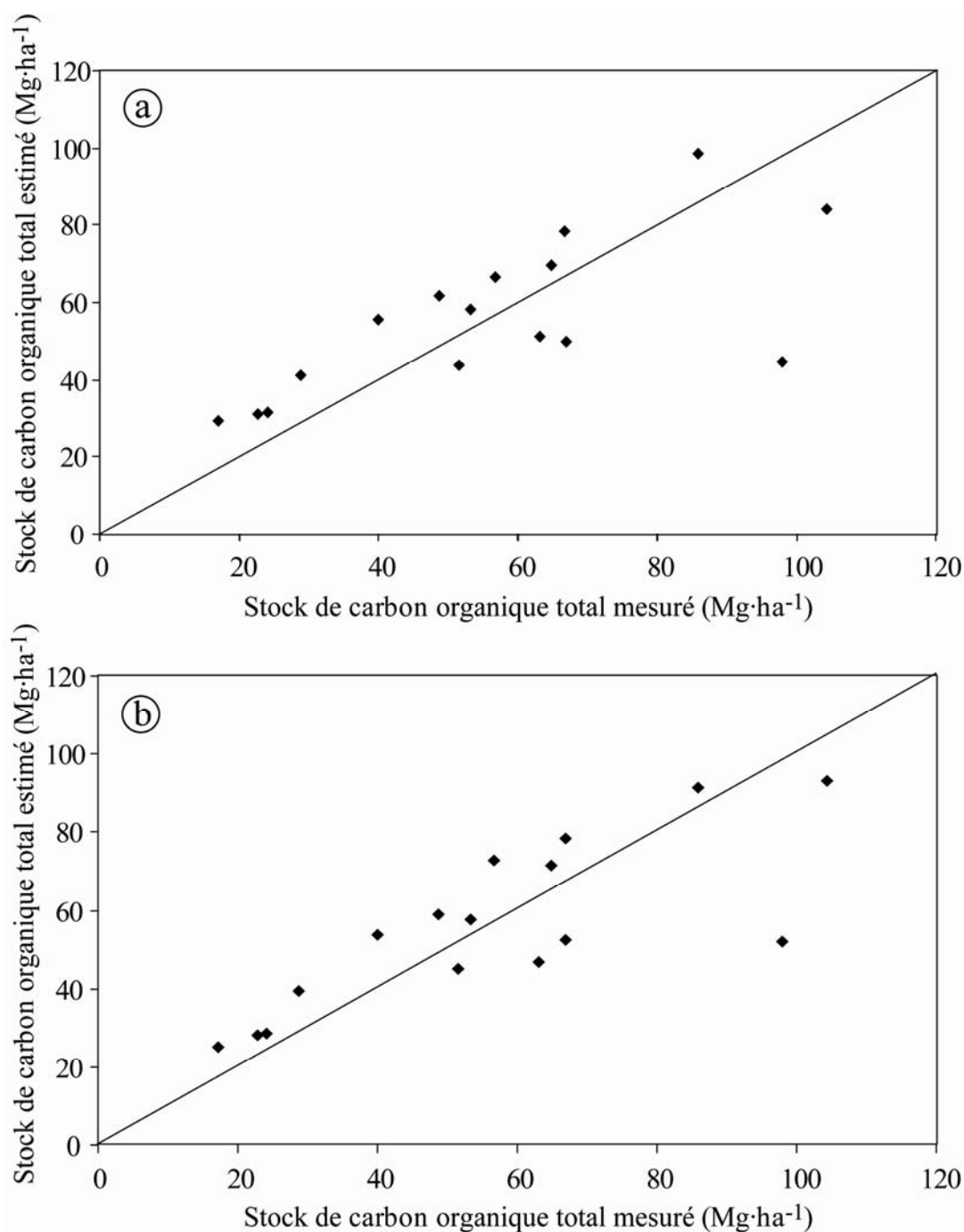


Figure 6.6. Relation entre les SCOT_s mesurés et les SCOT_s estimés pour a) 0-20 cm et b) 0-30 cm.

Le résultat de l'*EQM* pour le site de la zone intermédiaire est de 8,3 Mg·ha⁻¹ pour l'épaisseur 0-20 cm et de 15,3 Mg·ha⁻¹ pour 30 cm. L'estimation des *SCOT* est moins biaisée pour la profondeur de 20 cm. Les *SCOT*₂₀ ont été moins surestimés (*EME* = 0,16 Mg·ha⁻¹) que les *SCOT*₃₀ (*EME* = 0,2 Mg·ha⁻¹). De plus la précision est supérieure (*DSE* = 8,2 Mg·ha⁻¹) pour les *SCOT*₃₀ (*SCOT*₃₀ - *DSE* = 15,3 Mg·ha⁻¹).

IV.3. Conclusion des estimations dans la zone intermédiaire

On ne peut pas distinguer une influence du type d'usage par rapport au $SCOT_s$, $SCOT_{30}$ et $SCOT_{70}$.

L'usage n'a aucune conséquence sur la distribution de stocks entre la couche 0-30 cm et 70-100 cm.

Le $SCOT_{30}$ est mieux corrélé que le $SCOT_{20}$. En revanche le $SCOT_{30}$ a un biais plus important que le $SCOT_{20}$.

Nous avons ainsi pu estimer, avec une qualité relativement satisfaisante, le $SCOT$ d'un sol en utilisant le $SCOT$ de la surface 0-30 cm. Ceci permet de se soustraire au creusement des fosses, mais surtout d'augmenter le nombre de profils de sol étudiés et donc la précision et l'échelle.

V. Stock de carbone de la zone de Las Ramadas

V.1. Distribution du carbone organique total COT_S et des stocks de carbone organique total ($SCOT_S$) en profondeur

La figure 6.7 montre la distribution des COT_S avec la profondeur, pour chaque profil et chaque mode d'usage. La distribution des $SCOT_S$ moyens par mode d'usage est présentée dans la figure 6.8. Les $SCOT_S$ varient entre 112,8 et 215 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sans usage, de 95,84 à 98,31 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour le secteur sous usage extensif et de 58,11 à 242,32 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la situation sous usage intensif (tableau 6.3). Quelque soit l'usage, la zone de Las Ramadas possède les valeurs les plus élevées de $SCOT_S$ de toute la région.

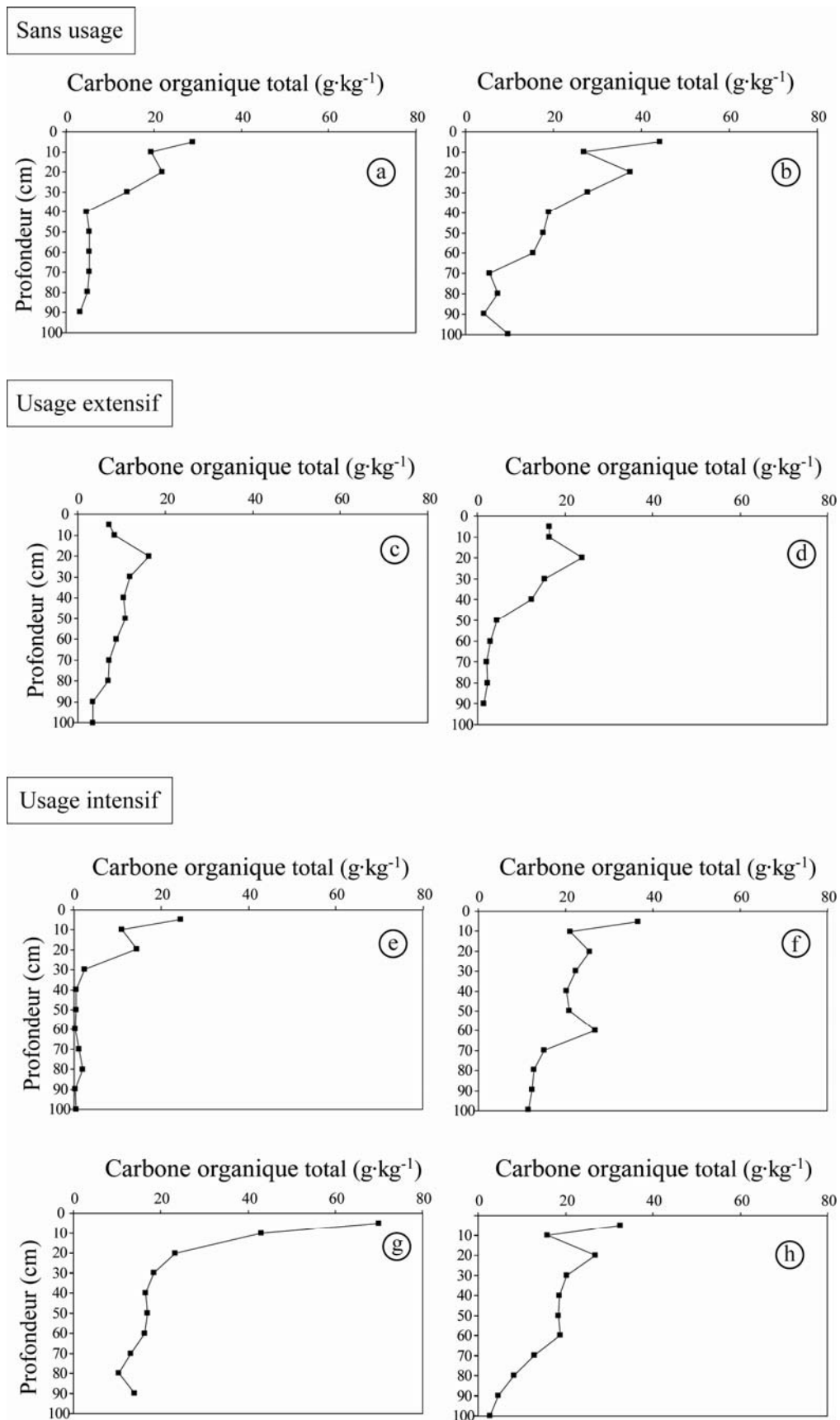


Figure 6.7. Distribution du carbone organique des profils (COT_s) en profondeur pour chaque mode d'usage dans la zone de Las Ramadas.

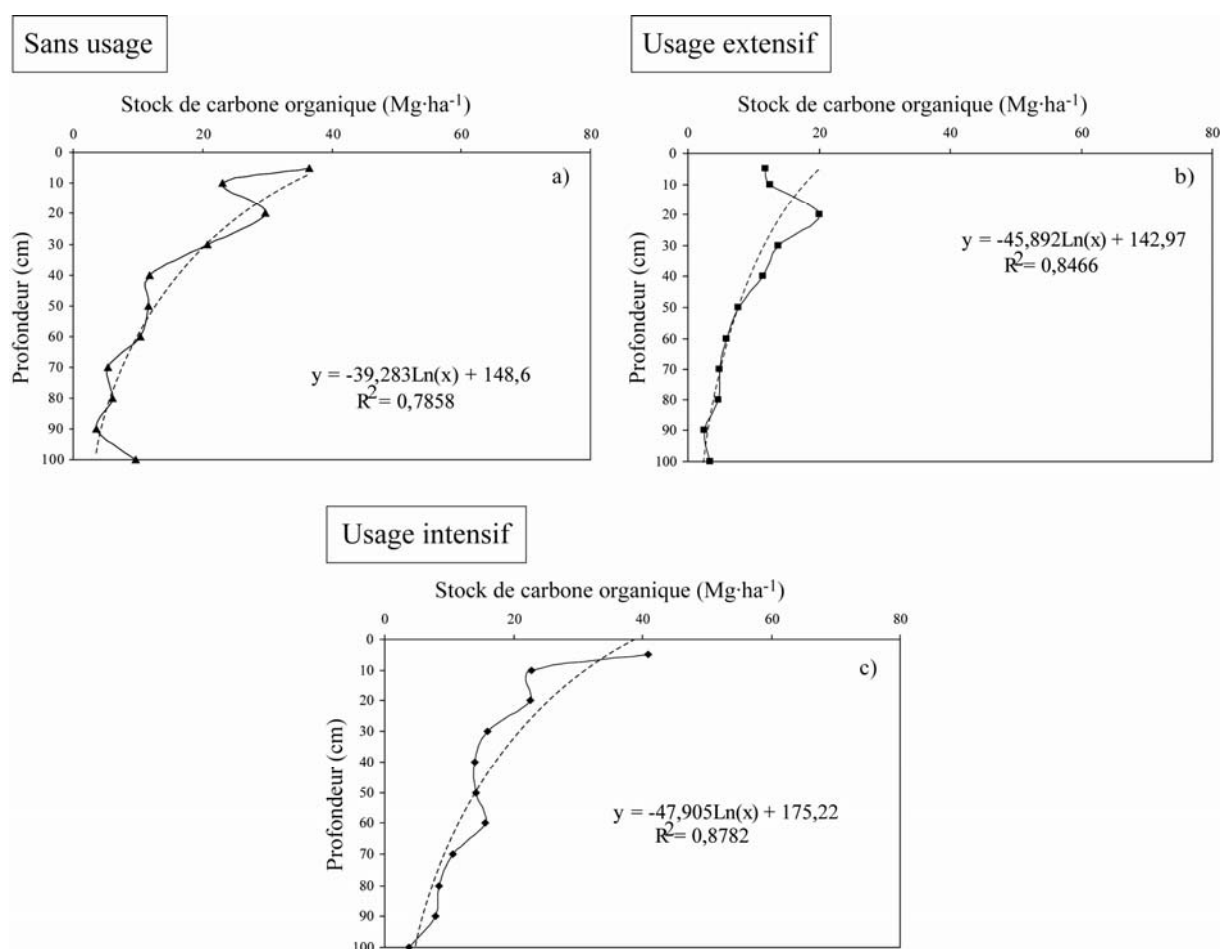


Figure 6.8. Distribution en profondeur des stocks de carbone organique totaux moyens par mode d'usage.

Tableau 6.3. Stock de carbone organique total (SCOT) sous les trois modes d'usage pour la zone de Las Ramadas. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

*Proportion par rapport au stock de carbone organique total du secteur préservé.

	Stock de carbone organique total (Mg·ha ⁻¹)		
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm
Secteur sans usage			
Profil 5	112,8	84,2	28,6
Profil 6	215	136,2	78,8
Moyenne	163,9	110,2 (67%)	53,7 (33%)
Secteur usage extensif			
Profil 7	95,8	44,2	51,7
Profil 8	98,3	72,2	26,1
Moyenne	98,8 (60%)*	58,2 (59%)	40,6 (41%)
Secteur usage intensif			
Profil 1	59,1	52,8	6,3
Profil 2	225,4	105,6	119,8
Profil 3	242,3	154,8	87,5
Profil 4	180,2	95,5	84,8
Moyenne	176,8 (108%)*	102,2 (58%)	74,6 (42%)

Le test de Fisher réalisé sur les valeurs de $SCOT_5$ montre qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative entre les trois situations d'usage ($P = 0,95$). Sur cette zone on voit plutôt l'effet de la position sur le gradient ouest-est, que l'effet de l'usage. Cela peut s'expliquer du fait qu'en haute-montagne, avec des températures moyennes inférieures et des précipitations moyennes plus importantes, le ralentissement de la dégradation de la MO masque l'effet de l'usage, qui lui amplifie ce ralentissement (Chapitre V).

Le stock de carbone organique total à 30 cm ($SCOT_{30}$) varie de 84,2 à 136,2 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sans usage, de 44,2 à 72,2 $Mg \cdot ha^{-1}$ sous usage extensif et de 52,8 à 154,8 $Mg \cdot ha^{-1}$ sous usage intensif (tableau 6.3). L'analyse des moyennes par le test de Fisher montre qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative entre les trois types d'usage ($P = 0,95$). Le comportement des stocks de la couche 0-30 cm est le même que le comportement du stock de la totalité du profil. L'explication à ce comportement a été faite dans le paragraphe précédent.

Le stock de carbone organique total entre 30 et 100 cm ($SCOT_{70}$) varie entre 28,6 et 78,8 $Mg \cdot ha^{-1}$ dans le secteur sans usage, de 26,1 à 51,7 $Mg \cdot ha^{-1}$ sous usage extensif et entre 6,3 et 119,8 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sous usage intensif (tableau 6.3). L'analyse statistique des moyennes des $SCOT_{70}$ montre qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative entre la condition sans usage et les usages extensif et intensif. Le comportement du $SCOT_{70}$ est le même que celui du $SCOT_{30}$ et du $SCOT_5$.

Les proportions des stocks entre 0-30 et 30-100 cm sont nettement différentes entre le secteur sans usage et les secteurs sous usage extensif et intensif. Les proportions des stocks entre 0-30 et 30-100 cm pour les secteurs sous usage extensif et intensif présentent une meilleure répartition de stocks entre la surface (60%) et la profondeur (40%) par rapport à la situation sans usage (67% surface – 33% profondeur) (tableau 6.3). Cela peut s'expliquer partiellement par la position topographique des profils du secteur sans usage. En effet, ces profils sont proches du sommet de la montagne où les horizons A, E et B sont presque inexistantes, favorisant en surface et en profondeur les ruissellements qu'entraînent les précipitations.

V.2. Prédiction des $SCOT_S$

Les résultats de la prédiction des $SCOT_S$ montrent que la relation entre le $SCOT_{20}$ et le $SCOT_S$ ($R^2 = 0,75$) est moins bonne que celle entre le $SCOT_{30}$ et le $SCOT_S$ ($R^2 = 0,83$). Ces relations ont été démontrées par l'estimation des $SCOT_S$ sur les 8 profils. La figure 6.9 montre la comparaison entre les $SCOT_S$ mesurés et ceux estimés.

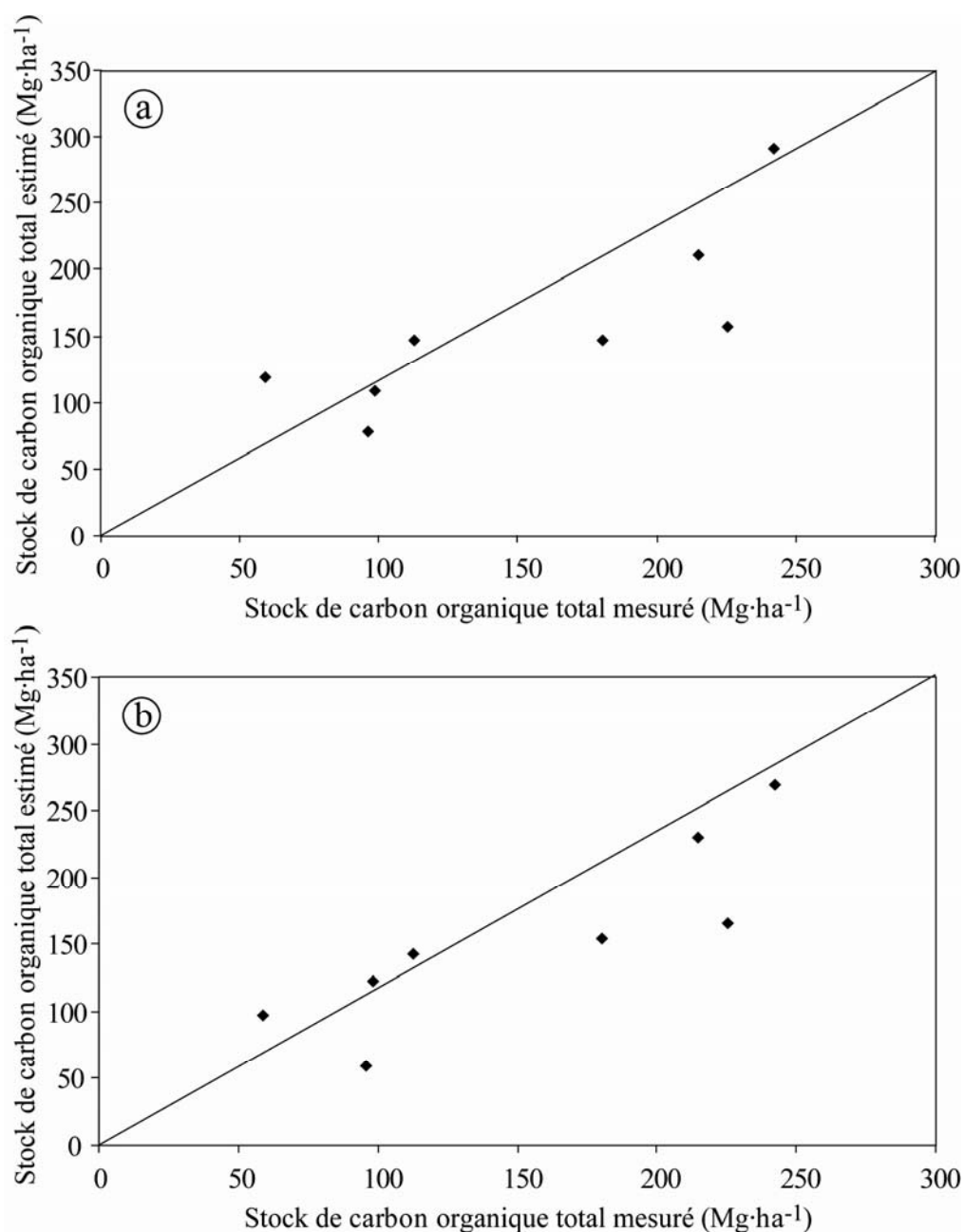


Figure 6.9. Relation entre les $SCOT_S$ mesurés et les $SCOT_S$ estimés pour a) 0-20 cm et b) 0-30 cm.

Le résultat de l'*EQM* pour le site de Las Ramadas est de $40,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour l'épaisseur 0-20 cm et de $34,4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour 0-30 cm. L'estimation des *SCOT* est donc meilleure pour la profondeur de 30 cm. Les *SCOT*₃₀ ont été moins surestimés (*EME* = $1,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) que les *SCOT*₂₀ (*EME* = $3,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). De plus la précision est supérieure (*DSE* = $34,4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pour les *SCOT*₃₀ (*SCOT*₂₀ - *DSE* = $40,7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

V.3. Conclusion des estimations à Las Ramadas

Nous n'avons pas observé une différence significative entre les usages extensif et intensif pour les trois types de stocks : *SCOT*₃₀, *SCOT*₇₀ et *SCOT*₅. Ceci s'explique par le fait que l'impact de l'usage sur les stocks de carbone est fonction de la vitesse de dégradation de la MO, c'est-à-dire que pour des vitesses de dégradation moindres, l'effet de l'usage tend à s'effacer.

On note également un second effet : l'usage n'a pas d'impact sur la distribution des stocks de carbone en profondeur.

Pour une zone de haute montagne nous avons pu estimer, avec une qualité relativement satisfaisante, le *SCOT* d'un sol en utilisant le *SCOT* de la surface 0-30 cm. Ceci permet de se soustraire au creusement des fosses, mais surtout d'augmenter le nombre de profils de sol étudié et donc la précision et l'échelle.

VI. Conclusions générales du chapitre

Les $SCOT_S$ augmente dans un gradient est-ouest.

Le $SCOT_S$ peut être estimé correctement au moyen d'un modèle de régression linéaire à partir du $SCOT_{30}$.

La zone proches de la côte (Las Cardas) présentent des $SCOT_S$ inversement proportionnel à l'intensité de l'usage. En direction de l'est (Talhuén-Flor del Norte et Las Ramadas) cet effet tend à s'inverser : les $SCOT_S$ sous usage intensifs sont les plus élevés.

Pour toutes les zones l'effet de l'usage tend à s'effacer avec la profondeur.

DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION

DISCUSSION GENERALE

ET

CONCLUSION

Les sols de la région semi-aride de Coquimbo, n'avaient jusqu'à présent pas fait l'objet d'étude de la qualité et de la quantité de la matière organique de ses sols. Et pourtant, la communauté scientifique locale s'interroge encore actuellement sur les impacts anthropiques sur les écosystèmes de cette région et définis comme étant fragiles et en particulier sur les conséquences sur le statut organique de leurs sols.

Plus globalement, il existe aujourd'hui un déficit d'information à propos des stocks de matière organique présents dans les sols des milieux arides et semi-arides, déficit encore plus marqué lorsqu'il s'agit de connaître les caractéristiques permettant de définir la composition de la matière organique.

De telles interrogations nous ont motivées pour essayer de préciser les relations qui existent entre les composantes du milieu, principalement le climat et la végétation, et le statut organique des sols, c'est-à-dire les caractéristiques quantitatives et qualitatives de la matière organique présente dans les sols. Dans ce cadre général, nous nous sommes fixés comme objectif particulier d'analyser les conséquences d'un usage agricole de ces sols sur leur statut organique en étudiant des situations réparties selon un transect altitudinal ouest-est.

Dans les chapitres qui ont précédé, nous avons présenté et discuté les résultats des analyses effectuées sur les différents sols sélectionnés. Le dernier chapitre, qui traite des

stocks de carbone, a partiellement fait l'objet d'un article en cours de publication. Dans les paragraphes suivants, nous allons tenter une discussion plus générale de nos résultats en reprenant les principaux points qui ont motivé cette étude et plus globalement l'objectif de ma thèse. Nous aborderons ainsi successivement les caractéristiques des sols étudiés le long du transect altitudinal sélectionné, les caractéristiques qualitatives et quantitatives de la matière organique de ces sols, les effets de leur usage agricole en fonction de la nature des pratiques et de leur intensité, et enfin les possibilités de modélisation de la distribution de stocks de carbone avec la profondeur.

Les sols de la région de Coquimbo

Les sols de la région de Coquimbo sont de type Aridisols avec des profondeurs de l'ordre de 80 cm. Bien que présentant des profils peu différenciés, les couleurs sont dans les dominantes brunes et les profils granulométriques révèlent une légère différenciation verticale avec une teneur en argile sensiblement plus élevée en profondeur (augmentation de quelques %). Pour chaque profil pour lequel nous disposons d'analyses granulométriques, nous avons calculé le rapport entre la teneur en argile moyenne dans les 30 premiers centimètres et la teneur en argile moyenne entre 30 et 100 cm de profondeur (tableau 7.1, figure 7.1). Les résultats montrent que ce rapport varie le long de la séquence régionale. Il est voisin de 2,5 pour la zone de Las Cardas, de 1 pour les zones de Talhuén, Flor del Norte, Camarico et San Pedro de Pichasca, et de 0,5 pour les zones d'El Palqui et Las Ramadas. Les valeurs observées pour la zone de Las Cardas sont soit liées à une discontinuité sédimentaire, soit à la présence d'un processus d'illuviation. Les valeurs enregistrées pour la zone d'El Palqui et Las Ramadas sont liées à un profil de sol faiblement différencié dans lequel les processus d'altération des minéraux primaires produisent des particules appartenant à la classe de taille des argiles. Enfin, pour l'ensemble des autres zones, aucune différenciation du profil de teneur en argile n'est observée.

Nous avons procédé au même type de calcul avec la teneur en sable. Le rapport est inférieur ou voisin de 1 pour l'ensemble des zones excepté pour celui d'El Palqui pour lequel il avoisine de 2,5. Dans ce dernier cas, la teneur en sable plus élevée dans l'horizon de surface est liée à des apports de pente très sableux.

Les densités apparentes sont élevées (voisines de 1,8 à 1,9 cm³×g⁻¹) en raison de la texture généralement grossière des sols et de leur teneur élevée en éléments grossiers. La détermination des teneurs en éléments grossiers et des densités apparentes n'est pas indemne de critiques. En effet, la connaissance des teneurs en éléments grossiers résulte dans notre étude d'une estimation visuelle de cette teneur. Elle est par conséquent très imprécise. Il y aurait lieu de préciser, sur un certain nombre de profils, les différences entre nos estimations visuelles et une mesure de la teneur en éléments grossiers par tamisage (norme AFNOR X 31-003 1998) (AFNOR, 1996). Concernant la densité apparente, elle est particulièrement difficile à mesurer dans des sols à teneur élevée en éléments grossiers. Face à cette difficulté, nous avons adopté une méthodologie nous permettant de répéter les déterminations sur un nombre élevé de profils. Une possibilité pour améliorer la connaissance de la densité apparente des sols étudiés pourrait consister en la mise en œuvre de la méthode dite « au sable » (Baize, 2000). Celle-ci présente en effet l'avantage de permettre la détermination de la teneur en éléments grossiers du volume de sol excavé avant la phase de remplissage par du sable.

Tableau 7.1. Évolution des teneurs en argiles et ses rapports moyens surface-profondeur sur un gradient ouest-est, région de Coquimbo, Chili.

Zone	Rapport moyen des teneurs en argile	Rapport moyen des teneurs en sable	Altitude (m)	Température (°C)	Précipitations
Las Cardas	2,5	1,0	220	16,5	99,9
Talhuén	1,1	0,9	300	15,2	128,7
Flor del Norte	1,7	0,7	300	15,2	128,7
Camarico	1,2	0,8	230	15,2	128,7
El Palqui	0,5	1,9	500	14,6	99,9
San Pedro de Pichasca	1,4	1,3	900	14,1	183,9
Las Ramadas	0,7	1,3	1500	15,4	172,2

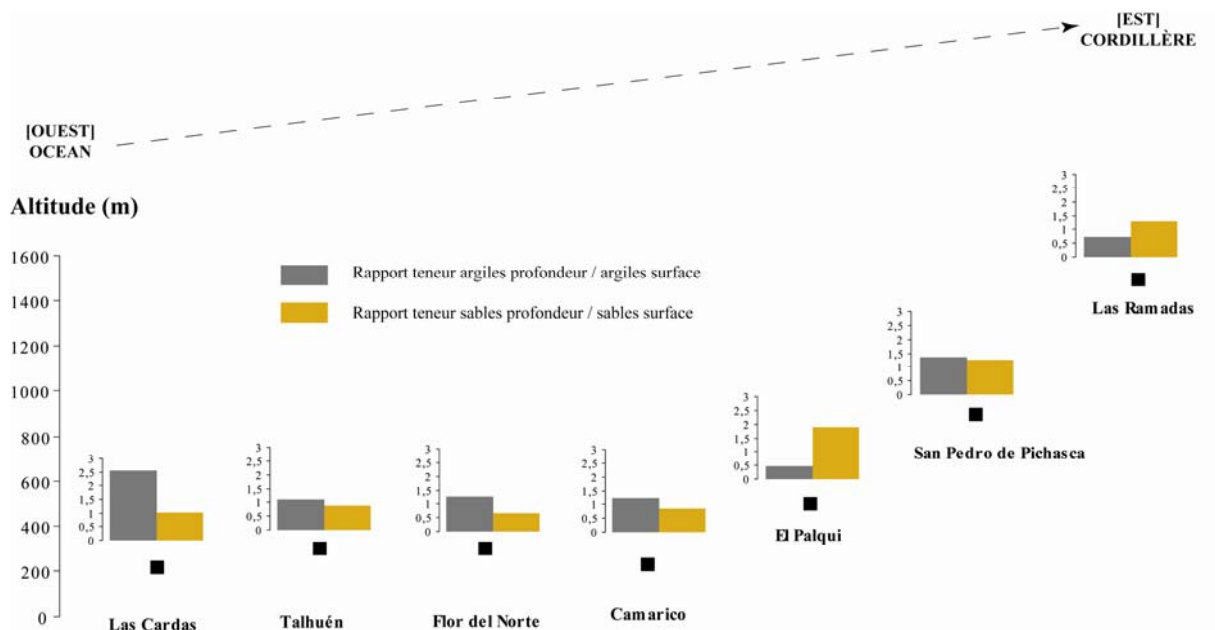


Figure 7.1. Évolution sur un transect altitudinal des rapports profondeur-surface argile et sables, des toutes les zones échantillonnées, région de Coquimbo, Chili.

Au sein de chaque zone, et si l'on met de côté les caractéristiques liées à la distribution de la matière organique des sols, il n'apparaît pas de différences entre les profils de sols étudiés qui puisse être attribuées à l'usage agricole des sols. En effet, toutes les différences relevées semblent pouvoir être mises en relation selon les cas, soit avec des différences du matériau parental du sol, soit des différences de position topographique.

En profondeur on a pu observer un assombrissement progressif des couleurs tout au long du transect. Ceci semble principalement s'expliquer par des conditions climatiques qui diffèrent d'une zone à une autre.

Qualité de la matière organique

En ce qui concerne la qualité de la matière organique de sols de la région de Coquimbo étudiés, nous avons constaté qu'elle s'expliquait par sa position géographique à l'échelle régionale, mais aussi par l'intensité de l'usage du sol, à l'échelle locale. Ainsi, à l'échelle régionale, les IH présentent une légère croissance d'ouest en est : ils sont directement proportionnels à l'altitude et inversement proportionnels aux précipitations et aux températures. On constate donc que le degré de dégradation de la MO diminue a priori

d'ouest en est, et qu'il se corrèle donc avec la température et les précipitations. Par ailleurs, les IH augmentent également en fonction de l'intensité de l'usage du sol et ce quelque soit la position sur le transect ouest-est. On en conclut que l'usage quel qu'il soit : pâturage ou cultures (noyers, vignes, artichauts), ralentit la dégradation de la MO.

De la même façon la diminution globale des IO d'ouest vers l'est marque plutôt un accroissement de la qualité de la MO, i.e. vraisemblablement d'une combinaison d'un accroissement de sa production et d'un ralentissement de sa dégradation dans les sols. A proximité de la côte les valeurs d'IO sont proportionnelles à l'intensité de l'usage, le phénomène tend à s'inverser vers l'est. On constate que les phénomènes d'oxydation et donc de dégradation de la matière organique sont plus sensibles à l'usage lorsque la température moyenne augmente. Au contraire, vers la cordillère, le comportement s'inverse : la dégradation de la MO se ralentit en fonction de l'intensité de l'usage, c'est-à-dire ici plus précisément de la mise en culture.

Les R400 sont généralement croissant avec la profondeur. Cette croissance semble s'atténuer, voir disparaître vers l'est du transect (Pichasca et Las Ramadas). On en conclut que les proportions de MO labile entre la surface et la profondeur tendent à s'équilibrer au fur et à mesure que l'on monte en altitude avec l'augmentation des précipitations moyennes et la décroissance des températures.

À l'échelle locale les valeurs d'IH sont faibles en surface et diminuent avec la profondeur quelque soit la zone et l'intensité de l'usage. Les valeurs des IO analysées sont assez élevées dès la surface et nous montre un comportement croissant en profondeur. Ces paramètres nous révèlent une MO d'emblée très dégradée, avec un taux de dégradation qui s'accroît encore en profondeur.

Teneurs en COT et stocks de carbone organique

En ce qui concerne les teneurs et stocks de carbone, nous avons conclu que les variations de ces paramètres étaient a priori sous la dépendance des mêmes facteurs que ceux qui régissent de la qualité de la matière organique : la position géographique, le type d'usage et son intensité.

Globalement les teneurs et stocks de MO augmentent donc régionalement selon un axe ouest-est. Ce comportement va dans le même sens qu'une augmentation des altitudes et des précipitations moyennes, à l'opposé des températures moyennes.

Les teneurs et stocks de MO du sol dépendent de la position sur cet axe ouest-est, en fonction de l'intensité de l'usage des terres. Les zones voisines à la côte, à plus basse altitude, avec des précipitations moyennes inférieures et des températures plus élevées, présentent un comportement inversement proportionnel à l'intensité de l'usage (Las Cardas, Talhuén), avec un stock maximal pour les secteurs sans usage. Pour les zones situées en moyenne et haute montagne le comportement s'inverse (Pichasca, Las Ramadas), à savoir un stock maximal pour les secteurs sous culture intensive. En particulier, le type d'usage de Las Cardas (pâturages) accentue encore plus les conséquences de l'intensité de l'usage : le pâturage étant une activité plutôt extractive de MO, où les apports en surface sont marginaux (excréments) et les apports racinaires faibles.

Par ailleurs, les stocks de carbone organique total (*SCOT*) augmentent selon un gradient ouest-est. En effet, et comme on l'a déjà signalé, ce phénomène s'explique par le ralentissement de la dégradation de la matière organique vers la zone de haute montagne, où les températures moyennes sont inférieures.

On pu déterminer aussi que la zone proche de la côte (Las Cardas) présente des *SCOT* inversement proportionnel à l'intensité de l'usage. En direction de l'est (Talhuén-Flor del Norte et Las Ramadas) cet effet tend à s'inverser : les *SCOT* sous usage intensifs sont les plus élevés. Les zones dites plus sensibles à l'intervention anthropique se trouveraient donc dans la moitié ouest de la région. Par ailleurs, le rapport des stocks entre 0-30 et 30-100 cm s'accroît avec l'intensité de l'usage : on a alors un déséquilibre accru entre la surface (plus riche) et la profondeur (moins riche).

Concernant la modélisation des *SCOT*, on a pu démontrer qu'il peut être estimé correctement au moyen d'un modèle de régression linéaire à partir du stock de carbone organique total à 30 cm (*SCOT*₃₀). De plus, l'analyse statistique nous a montré que l'impact de l'usage est observable sur la couche 0-30 cm. Au-delà de cette limite, l'effet de l'usage n'est pas identifiable.

L'ensemble de ces observations et notamment celles qui concernent la diminution des stocks de carbone et leur répartition au sein des profils de sols, dans des secteurs dont la mise en exploitation ne date que de quelques décennies, implique une très forte dynamique de la MO, ce qui semble de prime abord étonnant dans une région semi-aride et où les grands agents habituels du recyclage du carbone organiques tels que lombrics et/ou termites, semblent absents.

Perspectives

Cette thèse ne constitue qu'une première contribution à l'étude la matière organique des sols de milieu aride du Chili et bien inévitablement des questions importantes restent encore sans réponse.

En ce qui concerne les aspects de qualité de la matière organique, il reste à déterminer quels sont les agents de la dégradation de la matière organique de ce type de milieu. Des analyses plus fines (e.g. de biomarqueurs moléculaires) pourraient probablement nous apporter des éléments de réponse à cette question.

La modélisation, non seulement des proportions de stocks de carbone organique, mais leur distribution avec la profondeur, et ce tout d'abord en fonction de l'intensité de l'usage des terres, permettrait d'observer l'évolution des ces stocks. L'incorporation de l'échelle temporaire permettrait même de reconstruire la trajectoire suivie par l'écosystème, et de l'analyser du point de vue qualitatif.

Les aspects de distribution spatiale abordés par les géostatistiques s'avèrent dans l'immédiat comme un point essentiel qui reste à développer.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

A

- Aburto, F., C. Hernández, M. Pfeiffer, M. Casanova, et W. Luzio L. 2008.** Northern field-guide between 30° S and 33° 30' S, p. 76, *In* M. Casanova and W. Luzio, (eds.) The International Conference and Field Workshop on Soil Classification. Soil: A Work of Art of Nature. Universidad de Chile, Santiago, Ovalle and Tongoy, Chile.
- AFNOR. 1996.** Qualité des sols. Recueil des normes françaises. 534 p. 3 ed. AFNOR, Paris, France.
- Aguilera, S.M., G. Borie, P. Peirano, et G. Galindo. 1997.** Organic matter in volcanic soils in Chile: Chemical and biochemical characterization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 28(11-12):899-912.
- Alcayaga, S., et W. Luzio. 1986.** Clasificación taxonómica de los suelos de regiones desérticas y áridas del norte de Chile. *Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo* 5(5):141-144.
- Álvarez L., P. 1993.** Caracterización de suelos de la Isla Robert Shetland del Sur (Antártica). 82 p. Tesis. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Departamento de Ingeniería y Suelos. Santiago, Chile.
- Álvarez L., P. 2005.** Un itinéraire de l'eau, approche géographique et agronomique d'une gestion de l'irrigation en zone aride du Chili. 288 p. Thèse de Doctorat. Université d'Orléans, Faculté de Lettres, Langue et Sciences Humaines. IRD. Orléans, France.
- Andreux, F., P. Faivre, et M. Bonne. 1986.** Nature et dynamique des matières organiques impliquées dans les processus de podzolisation, p. 119-130, *In* D. Righi and A. Chauvel, (eds.) Podzol et Podzolisation. AFES - INRA, Plaisir, Paris, France.
- Arrouays, D., W. Deslais, et V. Bateau. 2001.** The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. *Soil Use and Management* 17(1):7-11.
- Asner, G.P., S. Archer, R.F. Hughes, R.J. Ansley, et C.A. Wessman. 2003.** Net changes in regional woody vegetation cover and carbon storage in Texas Drylands, 1937-1999. *Global Change Biology* 9(3):316-335.
- Assouline, S., D. Tessier, et A. Bruand. 2000.** A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resources Research* 36(12):3769-3769.

B

- Baize, D., et B. Jabiou. 1995.** Guide pour la description des sols. Techniques et pratiques. 375 p. INRA, Paris, France.
- Baize, D. 2000.** Guide des analyses en pédologie: choix-expression, présentation-interprétation. 257 p. 2 ed. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, France.
- Barker, C. 1974.** Pyrolysis Techniques for Source-Rock Evaluation. *AAPG Bulletin* 58(11_Part_1):2349-2361.
- Batjes, N.H. 1996.** Total carbon and nitrogen in the soil of world. *European Journal of Soil Science* 47(2):151-163.
- Batjes, N.H. 2000.** Effects of mapped variation in soil conditions on estimates of soil carbon and nitrogen stocks for South America. *Geoderma* 97(1-2):135-144.

- Behar, F., V. Beaumont, et H.L. De B. Penteado. 2001.** Technologie Rock-Eval 6 : performances et développements. *Oil & Gas Science and Technology* 56(2):111-134.
- Bernoux, M., D. Arrouays, C. Cerri, P.M. De Alencastro Graça, B. Volkoff, et J. Trichet. 1998.** Estimation des stocks de carbone des sols du Rondônia (Amazonie Brésilienne). *Étude et Gestion des Sols*. 5(1):pp 31-42.
- Bernoux, M., D. Arrouays, C.E.P. Cerri, et C.C. Cerri. 2006.** Chapter 37 Regional Organic Carbon Storage Maps of the Western Brazilian Amazon Based on Prior Soil Maps and Geostatistical Interpolation Developments in Soil Science, p. 497-506, 629, *In* A. B. M. a. M. V. P. Lagacherie, (ed.) *Digital Soil Mapping - An Introductory Perspective*, Volume 31 ed. Elsevier.
- Billa, M., D. Cassard, A.L.W. Lips, V. Bouchot, B. Tourlière, G. Stein, et L. Guillou-Frottier. 2004.** Predicting gold-rich epithermal and porphyry systems in the central Andes with a continental-scale metallogenic GIS. *Ore Geology Reviews* 25(1-2):39-67.
- Bruand, A., P. Pérez Fernández, et O. Duval. 2003.** Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use and Management* 19(3):232-242.

C

- Carter, M.R. 1990.** Relationship of strength properties to bulk density and macroporosity in cultivated loamy sand to loam soils. *Soil and Tillage Research* 15(3):257-268.
- Casanova P., M., W. Luzio L., C. Benavides Z., A. Carrasco R., et J. Haberland A. 1995.** Informe de práctica profesional estación experimental Las Cardas, IV región. Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Departamento de Ingeniería y Suelos. Santiago, Chile.
- Cassard, D. 1999.** GIS Andes: A metallogenic GIS of the Andes Cordillera, p. 147-150 4th International Symposium on Andean Geodynamics. Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Göttingen, Germany.
- Caviedes, E., et P. Dadget. 1984.** Les climats méditerranéen du Chili : contribution pour une nouvelle synthèse. *Actualités botaniques, Bulletin de la Société Botanique Française* 12(3-4): 205-212.
- Chesworth, W., (ed.) 2008.** Encyclopedia of soil science, 845 p. Encyclopedia of earth sciences series. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Ciesielski, H., et T. Sterckeman. 1997.** Determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils by means of cobalt hexamine trichloride. Effects of experimental conditions. *Agronomie* 17(1):1-7.
- Comont, L., F. Laggoun-Défarge, et J.-R. Disnar. 2006.** Evolution of organic matter indicators in response to major environmental changes: The case of a formerly cut-over peat bog (Le Russey, Jura Mountains, France). *Organic Geochemistry* 37(12):1736-1751.
- Conant, R.T., J.M. Klopatek, R.C. Malin, et C.C. Klopatek. 1998.** Carbon pools and fluxes along an environmental gradient in northern Arizona. *Biogeochemistry* 43(1):43-61.
- Conant, R.T., et K. Paustian. 2002.** Spatial variability of soil organic carbon in grasslands: implications for detecting change at different scales. *Environmental Pollution* 116(Supplement 1):S127-S135
- Copard, Y., J.R. Disnar, et J.F. Becq-Giraudon. 2002.** Erroneous maturity assessment given by Tmax and HI Rock-Eval parameters on highly mature weathered coals. *International Journal of Coal Geology* 49(1):57-65.

Cortés U., M. 2008. Caracterización fenológica en vid de mesa (*Vitis vinifera* L.) cv Thompson Seedless, en dos zonas de la cuenca del Limarí / Región de Coquimbo, Chile. 93 p. Tesis. Universidad de La Serena, Facultad de Ciencias, Escuela de Agronomía. La Serena, Chile.

Casanova, M., W. Luzio, et R. Maldonado. 2007. Correlación entre Word Reference Base y Soil Taxonomy para los suelos de la VII región del Maule de Chile. R. C. Suelo Nutr. Veg. 7: 14-21.

D

D'Andrea, N. 1997. Recomposition de l'espace rural de la Région de Coquimbo (Chili). Problématique de la migration dans les communautés agricoles. 97 p. Mémoire DESS. Université d'Aix-Marseille, Laboratoire Population-Environnement, ORSTOM. Aix-En-Provence, France.

Deckers, J., F. Nachtergaele, et O. Sapaargaren. 2002. Tropical soils in the classification systems of USDA, FAO and WRB, In I. S. R. a. I. Centre, (ed.) Evolution of tropical soil science: past and future: workshop. Royal Academy of Overseas Sciences, Brussels, Bergium.

Di-Giovanni, C., J.-R. Disnar, V. Bichet, et M. Campy. 1998. Sur la présence de matières organiques mésocénozoïques dans des humus actuels (bassin de Chaillexon, Doubs, France). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science 326(8):553-559.

Disnar, J.R. 1982. Étude expérimentale de la fixation de divers métaux sur une matière organique sédimentaire d'origine algaire : maturation thermique des composés formés. 283 p. Thèse Doctorat d'État. Université d'Orléans, Département Géosciences. Orléans, France.

Disnar, J.R., B. Guillet, D. Keravis, C. Di-Giovanni, et D. Sebag. 2003. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitations. Organic Geochemistry 34(3): 327-343.

Disnar, J.R., et J. Trichet. 1984. The influence of various divalent cations (UO₂ 2p, Cu2p, Pb2p, Co2p, Ni2p, Zn2p, Mn2p) on thermally induced evolution of organic matter isolated from an algal mat. Organic Geochemistry 6: 865-874.

Don, A., J. Schumacher, M. Scherer-Lorenzen, T. Scholten, et E.-D. Schulze. 2007. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites -- Implications for measuring soil carbon stocks. Geoderma 141(3-4): 272-282.

Donoso, C. 1992. Ecología Forestal. El bosque y su medioambiente. 369 p. 3 ed. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.

Duchaufour, P., et B. Souchier. 1977. Pédologie 1. Pédogenèse et classification. 477 p. Masson, Paris, France.

E

Ellies, A., C. Ramirez, et R. Mac Donald. 2005. Organic matter and wetting capacity distribution in aggregates of Chilean soils. Catena 59(1):69-78.

Espitalié, J., G. Deroo, et F. Marquis. 1985_a. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. Première partie. Revue de l'Institut Français du Pétrole. 40(5): 563-579.

Espitalié, J., G. Deroo, et F. Marquis. 1985_b. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. Deuxième partie. Revue de l'Institut Français du Pétrole. 40(6): 755-784.

Espitalié, J., G. Deroo, et F. Marquis. 1986. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. Troisième partie. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*. 41(1): 73-89.

Espitalié, J., J.L. Laporte, M. Madec, F. Marquis, P. Leplat, J. Paulet, et A. Boutefeu. 1977. Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. *Oil & Gas Science and Technology* 32(1): 23-42.

F

Feng, Q., K.N. Endo, et C. Guodong. 2002. Soil carbon in desertified land in relation to site characteristics. *Geoderma* 106: 21-43.

Flores, R. 1983. Pedogénesis de cuatro Aridisols en el secano costero de la IV Región de Chile. 61 p. Tesis de Licenciado en Ciencias Agrícolas. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. Santiago, Chile.

Franzluebbers, A.J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* 66(2): 95-106.

G

García, R. 2004. Inferencia estadística y diseño de experimentos. 734 p. 1 ed. Editorial Universitaria de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

González, C., F. Santibáñez Q., et G. Soto M., (eds.) 2001. Compendio de información ambiental, socioeconómica y silvoagropecuaria de la IV región de Coquimbo, pp. 1-120. INDAP-PRODECOP and AGRIMED-Universidad de Chile, La Serena, Chile.

Grais, B. 2003. Méthodes statistiques. Techniques statistiques -2. 401 p. 3 ed. Dunod, Paris, France.

H

Halitim, A., M. Robert, D. Tessier, et R. Prost. 1984. Influence of Exchangeable Cations (Na, Ca, Mg) and Salt Concentration on the Physical-Properties (Water-Retention, Hydraulic Conductivity) of Montmorillonite. *Agronomie* 4(5): 451-459.

Heredia, W., P. Peirano, G. Borie, H. Zunino, et M. Aguilera. 2007. Organic carbon balance in Chilean volcanic soils after human intrusion and under different management practices. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* (57): 329-334.

Hernanz, J.L., R. López, L. Navarrete, et V. Sánchez-Girón. 2002. Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain. *Soil & Tillage Research* (66): 129-141.

I

IGM. 1988. Geografía de Chile. Tomo IV Región. 425 p. 1 ed. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile.

INE. 2007. VII Censo Agropecuario y Forestal [Online]. Available by Instituto Nacional de Estadísticas (INE) (posted December 2007; verified 1 january).

IPCC. 2001. Summary for policy makers, p. 944, *In* J. T. Houghton, Ding, Y., Griggs, D.J., Nougier, M., Van der Liden, P.J., Xiaosu, D., (ed.) *The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge.

IUSS Working Group WRB. 2006. World reference base for soil resources 2006. *World Soil Resources Reports n°103.* 145 p. FAO, Rome.

J

Jobbágy, E., et R. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10(2): 423 - 436.

L

Lafargue, E., F. Marquis, et D. Pillot. 1998. Les applications de Rock-Eval 6 dans l'exploration et la production des hydrocarbures, et dans les études de contamination des sols. *Oil & Gas Science and Technology* 53(4): 421-437.

Lailhacar, S. 1985. Las grandes formaciones vegetales de las zonas desérticas y mediterráneas perárida y árida de Chile: con énfasis en sus aptitudes forrajeras. *Boletín Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo* 5: 145-231.

Lemenih, M., et F. Itanna. 2004. Soil carbon stocks and turnovers in various vegetation types and arable lands along an elevation gradient in southern Ethiopia. *Geoderma* 123(1-2): 177-188.

Lozet, J., et C. Mathieu. 2002. *Dictionnaire de sciences du sol.* 575 p. 4 ed. Lavoisier, Paris, France.

Luzio L., W. 1986. Génesis y clasificación de los suelos de regiones áridas y desérticas de Chile. *Boletín Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo* 5(5):1-28.

Luzio L., W. 1994. Los suelos de Chile, *In* E. W. Vera, (ed.) *Suelos, una visión actualizada del recurso,* Vol. 38, 2 ed. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Luzio L., W., et S. Alcayaga. 1992. Mapa de asociaciones de Grandes Grupos de suelos de Chile. *Agricultura Técnica* 52(4): 347-353.

M

Malamoud, K., A.B. McBratney, B. Minasny, et D.J. Field. 2009. Modelling how carbon affects soil structure. *Geoderma* 149(1-2): 19-26.

Martínez, E., J.P. Fuentes, et E. Acevedo. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 8(1): 68-96.

Masto, R.E., P.K. Chhonkar, T.J. Purakayastha, A.K. Patra, et D. Singh. 2008. Soil Quality Indices for Evaluation of Long-Term Land Use and Soil Management Practices in Semi-Arid Sub-Tropical India. *Land Degradation & Development* 19(5): 516-529.

Matus, F.J., et C.R. Maire G. 2000. Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica* 60(2): 112-126.

- Monnier, G., P. Stengel, et J.C. Fiès. 1973.** Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité des sols. *Annales Agronomiques* 24(5): 533-545.
- Muñoz, C., C.M. Monreal, M. Schnitzer, et E. Zagal. 2008.** Influence of *Acacia caven* (Mol) coverage on carbon distribution and its chemical composition in soil organic carbon fractions in a Mediterranean-type climate region. *Geoderma* 144(1-2): 352-360.
- Munsell Color. 2000.** Munsell soil color charts.

N

- Noellemeyer, E., F. Frank, C. Alvarez, G. Morazzo, et A. Quiroga. 2008.** Carbon contents and aggregation related to soil physical and biological properties under a land-use sequence in the semiarid region of central Argentina. *Soil & Tillage Research* 99(2): 179-190.
- Novoa, J.E., et D. López. 2001.** IV Región: el escenario geográfico físico, p. 13 - 28, *In* F. A. Squeo, G. Arancio, y J.R. Gutiérrez, (ed.) Libro Rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: región de Coquimbo. Ediciones Universidad de la Serena, La Serena, Chile.
- Novoa, R., et S. Villaseca. 1989.** Mapa agroclimático de Chile. 221 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile.
- Nyssen, J., H. Temesgen, M. Lemenih, A. Zenebe, N. Haregeweyn, et M. Haile. 2008.** Spatial and temporal variation of soil organic carbon stocks in a lake retreat area of the Ethiopian Rift Valley. *Geoderma* 146(1-2): 261-268.

O

- Oyarzún L., R., et P. Alvarez L. 2001.** Morfología de suelos de la cuenca de Talhuén del secano semiárido de la IV región, Chile. *Agricultura Técnica* 61(4): 517-521.

P

- Pankhurst, R., et F. Hervé. 2007.** Introduction and overview, p. 414, *In* T. Moreno and W. Gibbons, (eds.) *The Geology of Chile*. The Geological Society, Bath, UK.
- Paskoff, R. 1993.** Geomorfología de Chile semiarido. 321 p. 1 ed. Facultad de Humanidades, Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Peralta, J.M. 1986.** Reconocimiento semi-detallado de suelos en el sector costero de la IV región, mediante el uso de Lands Units. 317 p. Tesis para optar al título profesional de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería y Suelos. Santiago.
- Peralta O., N. 2005.** Estudio de factibilidad económica de un servicio de gestión de riego, para regantes del Canal Camarico, Cuenca de Río Limarí, IV Región. 85 p. Tesis. Univesidad de La Serena, Facultad de Ciencias, Escuela de Agronomía. La Serena, Chile.
- Piccolo, G.A., A.E. Andriulo, et B. Mary. 2008.** Changes in soil organic matter under different land management in Misiones province (Argentina). *Scientia Agricola* 65(3): 290-297.
- Pouget, M.-J., E. Caviedes, P. Hamelin, D. Rémy, R. Mathieu, V. Lira, et D. Álvarez. 1996.** Ambiente árido y desarrollo sustentable. La provincia de Limarí. 107 p. 1 ed. Universidad de Chile -

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales - Centro de Estudios de Zonas Áridas (CEZA) - ORSTOM - Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, Santiago, Chile.

R

- Reicosky, D.C., W.A. Dugas, et H.A. Torbert. 1997.** Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. *Soil and Tillage Research* 41(1-2): 105-118.
- Romero, H. 1985.** Geografía de Chile. Tomo IX, geografía de los climas. 243 p. 1 ed. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile.
- Roca-Pascual, N., et M.S. Pazos. 2001.** The WRB applied to Argentinian soils: two case studies, p. 191-197, In E. Micheli, et al., (eds.) *Soil classification 2001*. European Soil Bureau - Research Report N°7, Valence, Hungary.

S

- Salazar, O., M. Casanova, et W. Luzio. 2005.** Correlación entre World Reference Base y Soil Taxonomy para los suelos de la X región de Los Lagos de Chile. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 5(2): 35-45.
- Sánchez, A., et R. Morales. 1998.** Las regiones de Chile. Espacio físico y humano-económico. 425 p. 2ª ed. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.
- Schaap, M.G. 2004.** Accuracy and uncertainty in PTF predictions, p. 33-43, In a. W. J. R. Y. Pachepsky, (ed.) *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*, Vol. Volume 30. Elsevier.
- Schlatter, J., R. Grez, et V. Gerding. 2003.** Manual para el reconocimiento de suelos. 114 p. 3 ed. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Schulze, E.-D. 2005.** Biological control of the terrestrial carbon sink. *Biogeosciences Discuss.* J1 - BGD 2(5): 1283-1329.
- Scott, N.A., K.R. Tate, D.J. Giltrap, C. Tattersall Smith, H.R. Wilde, P.J.F. Newsome, et M.R. Davis. 2002.** Monitoring land-use change effects on soil carbon in New Zealand: quantifying baseline soil carbon stocks. *Environmental Pollution* 116(Supplement 1): S167-S186.
- Sebag, D., J.R. Disnar, B. Guillet, C. Di Giovanni, E.P. Verrecchia, et A. Durand. 2006.** Monitoring organic matter dynamics in soil profiles by 'Rock-Eval pyrolysis': bulk characterization and quantification of degradation. *European Journal of Soil Science* 57(3): 344-355.
- Selvaradjou, S.-K., L. Montanarella, O. Spaargaren, et D. Dent. 2005.** European Digital Archive of Soil Maps (EuDASM) - Soil Maps of Latin America and Caribbean Islands [Online]. Available by Office of the Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Shrestha, G., et P.D. Stahl. 2008.** Carbon accumulation and storage in semi-arid sagebrush steppe: Effects of long-term grazing exclusion. *Agriculture Ecosystems & Environment* 125(1-4): 173-181.
- Singh, S.K., A.K. Singh, B.K. Sharma, , et J.C.Tarafdar. 2007.** Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan, India. *Journal of Arid Environments* 68: 408 - 421.

- Soto, G., A. Bruand, J.R. Disnar, P. Alvarez et A. Gallaud. 2001.** Soumis à *Chilean Journal of Agricultural Research*. Stock of soil organic carbon in arid soils of the Coquimbo region (Chile): consequences of goat grazing.
- Squeo, F.A., G. Arancio, C. Marticorena, M. Muñoz et J.R. Gutiérrez. 2001.** Diversidad vegetal de la IV región de Coquimbo, Chile, p. 179-158, *In* F. A. Squeo, G. Arancio y J.R. Gutiérrez, (ed.) Libro Rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: región de Coquimbo. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Soil Survey Staff. 1999.** Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd ed. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook 436.
- Soil Survey Division Staff. 1993.** Soil survey manual. 437 p. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Handbook 18, Washington D.C., USA.
- Stavi, I., E.D. Ungar, H. Lavee, et P. Sarah. 2008.** Grazing-induced spatial variability of soil bulk density and content of moisture, organic carbon and calcium carbonate in a semi-arid rangeland. *CATENA* 75(3): 288-296.
- Stolpe, N., C. Munoz, E. Zagal, et C. Ovalle. 2008.** Modeling soil carbon storage in the "Espinal" agroecosystem of central Chile. *Arid Land Research and Management* 22(2): 148-158.

T

- Tiessen, H., C. Feller, E. Sampaio, et P. Garin. 1998.** Carbon sequestration and turnover in semiarid savannas and dry forest. *Climatic Change* 40(1): 105-117.

V

- Volland-Tuduri, N. 2005.** Nature et mode d'assemblage des constituants minéraux et organiques dans les Ferrasols de la région des Cerrados (Brésil). 245 p. Thèse de doctorat. Université d'Orléans, École Doctorale Sciences et Technologies. Orléans, France.

W

- Wösten, J.H.M., Y.A. Pachepsky, et W.J. Rawls. 2001.** Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* 251(3-4): 123-150.

Z

- Zagal, E., et C. Córdova. 2005.** Indicadores de calidad de la materia orgánica del suelo en un andisol cultivado. *Agricultura Técnica* 65(2):186-197.
- Zagal, E., N. Rodríguez, I. Vidal, et A.B. Flores. 2002.** La fracción liviana de la materia orgánica de un suelo volcánico bajo distinto manejo agronómico como índice de cambios de la materia orgánica lábil. *Agricultura Técnica* 62(2): 284-296.

TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX

CHAPITRE I: CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE

Figure 1.1. Région de Coquimbo a) carte topographique et b) carte géomorphologique.

Figure 1.2. Photos illustrant des zones de la frange littorale a) Los Vilos, b) Las Cardas et c) (Las Cardas).

Figure 1.3. Photos illustrant des zones de vallées fluviales a) Flor del Norte et b) Talhuén.

Figure 1.4. Photos illustrant a) une zone de moyenne montagne (San Pedro de Pichasca) et b) une zone d'interfleuve (Barraza).

Figure 1.5. Photos illustrant des zones de la haute cordillère a) Tulahuén oriente et b) Las Ramadas.

Figure 1.6. Carte géologique de la région de Coquimbo.

Figure 1.7. Carte des sols de la région de Coquimbo.

Figure 1.8. Carte des températures moyennes au mois de a) janvier et b) juillet de la région de Coquimbo.

Figure 1.9. Carte des précipitations annuelles de la région de Coquimbo.

CHAPITRE II: LES SITES D'ETUDE

Figure 2.1. Photos de Las Cardas prises en été, a) secteur mis en réserve et b) secteur extensif, c) secteur sous agriculture intensive (pâturage).

Figure 2.2. Photos de Talhuén prises en été, a) secteur non exploité et b) secteur sous agriculture intensive (culture d'artichauts).

Figure 2.3. Photos de Flor del Norte prises en été, a) secteur non exploité et b) secteur sous agriculture intensive (culture de noyer), c) secteur sous agriculture intensive (luzerne).

Figure 2.4. Photos de Camarico prises en été, secteur sous agriculture intensive (vignoble).

Figure 2.5. Photos d'El Palqui prises en été, secteur sous agriculture intensive (vignoble).

Figure 2.6. Photos de San Pedro de Pichasca prises en été, a) secteur mis en réserve, b) secteur sous agriculture extensive (ancienne prairie abandonnée) et c) secteur sous agriculture intensive (vignoble).

Figure 2.7. Photos de Las Ramadas prises en été, a) secteur mis en réserve, b) secteur sous agriculture extensive (noyers de 8 mois) et c) secteur sous agriculture intensive (noyers de 10 ans).

CHAPITRE III: MATERIEL ET METHODES

Figure 3.1. Vue d'ensemble du Rock-Eval 6 Turbo (a) et schéma de son circuit d'analyse (b) (d'après Behar *et al.*, 2001).

CHAPITRE IV: LES SOLS DES SITES ETUDIES

Figure 4.1. Relation entre la teneur en argile et la capacité d'échange cationique de Las Cardas.

Figure 4.2. Profil du secteur sans usage, zone de Las Cardas, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.3. Photo profil sous usage extensif, zone de Las Cardas, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.4. Profil et environnement sous usage intensif, zone de Las Cardas, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.5. Profil et environnement sans usage, secteur de Talhuén, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.6. Profil et environnement secteur sous usage intensif, zone de Talhuén, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.7. Profil et environnement, secteur sans usage, zone de Flor del Norte, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.8. Profil et environnement sous usage intensif, zone de Flor del Norte, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.9. Profil et son environnement secteur sous usage intensif, zone de Camarico, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.10. Paysage secteur sous usage intensif, zone d'El Palqui, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.11. Profil et environnement secteur sans usage, zone de San Pedro de Pichasca, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.12. Profil et environnement secteur sous usage extensif, zone de San Pedro de Pichasca, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.13. Profil et environnement secteur sous usage intensif, zone de San Pedro de Pichasca, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.14. Relation entre la teneur en argile et la capacité d'échange cationique de Las Ramadas.

Figure 4.15. Profil et environnement secteur sans usage, zone de Las Ramadas, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.16. Profil et environnement secteur sous usage extensif, zone de Las Ramadas, région de Coquimbo, Chili.

Figure 4.17. Profil et environnement secteur sous usage intensif, zone de Las Ramadas, région de Coquimbo, Chili.

CHAPITRE V: ANALYSES DE LA MATIERE ORGANIQUE DES SOLS

Figure 5.1. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de Las Cardas.

Figure 5.2. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de Talhuén.

Figure 5.3. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de Flor del Norte.

Figure 5.4. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de Camarico.

Figure 5.5. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone d'El Palqui.

Figure 5.6. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de San Pedro de Pichasca.

Figure 5.7. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de Las Ramadas.

CHAPITRE VI: MODELISATION DES STOCKS DE CARBONE

Figure 6.1. Distribution du carbone organique des profils (COTS) en profondeur pour chaque mode d'usage dans la zone de Las Cardas.

Figure 6.2. Distribution en profondeur des stocks de carbone organique totaux moyens par mode d'usage.

Figure 6.3. Relation entre les SCOTS mesurés et les SCOTS estimés pour a) 0-20 cm et b) 0-30 cm.

Figure 6.4. Distribution du carbone organique des profils (COTS) en profondeur pour chaque mode d'usage dans la zone intermédiaire.

Figure 6.5. Distribution en profondeur des stocks de carbone organique totaux moyens par mode d'usage.

Figure 6.6. Relation entre les SCOTS mesurés et les SCOTS estimés pour a) 0-20 cm et b) 0-30 cm.

Figure 6.7. Distribution du carbone organique des profils (COTS) en profondeur pour chaque mode d'usage dans la zone de Las Ramadas.

Figure 6.8. Distribution en profondeur des stocks de carbone organique totaux moyens par mode d'usage.

Figure 6.9. Relation entre les SCOTS mesurés et les SCOTS estimés pour a) 0-20 cm et b) 0-30 cm.

DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION

Figure 7.1. Évolution sur un transect altitudinal des rapports profondeur-surface argile et sables, des toutes les zones échantillonnées, région de Coquimbo, Chili.

CHAPITRE I: CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE

Tableau 1.1. Classification des sols des régions désertiques.

Tableau 1.2. Classification des sols des régions arides et semi-arides.

Tableau 1.3. Classification des sols de la région centrale.

Tableau 1.4. Classification des sols de la région centre – sud.

Tableau 1.5. Classification des sols de la région sud.

Tableau 1.6. Classification des sols de la région de Coquimbo.

CHAPITRE II: LES SITES D'ETUDE

Tableau 2.1. Paramètres climatiques de la zone de Las Cardas, région de Coquimbo.

Tableau 2.2. Paramètres climatiques des zones de Talhuén, Flor del Norte et Camarico, région de Coquimbo.

Tableau 2.3. Paramètres climatiques de la zone d'El Palqui, région de Coquimbo.

Tableau 2.4. Paramètres climatiques de la zone de Pichasca, région de Coquimbo.

Tableau 2.5. Paramètres climatiques de la zone de Las Ramadas, région de Coquimbo.

CHAPITRE III: MATERIEL ET METHODES

Tableau 3.1. Distribution du nombre de profils par site échantillonné et mode d'usage.

CHAPITRE IV: LES SOLS DES SITES ETUDIES

Tableau 4.1. Caractéristiques générales des sols de la zone de Las Cardas.

Tableau 4.2. Caractéristiques générales des sols de la zone de Talhuén.

Tableau 4.3. Caractéristiques générales des sols de la zone de Flor del Norte.

Tableau 4.4. Caractéristiques générales des sols de la zone de Camarico.

Tableau 4.5. Caractéristiques générales des sols de la zone d'El Palqui.

Tableau 4.6. Caractéristiques générales des sols de la zone de San Pedro de Pichasca

Tableau 4.7. Caractéristiques générales des sols de la zone de Las Ramadas.

CHAPITRE V: ANALYSES DE LA MATIERE ORGANIQUE DES SOLS

Tableau 5.1. Données quantitatives (COT, stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) des trois secteurs sous trois modes d'usage différents à Las Cardas.

Tableau 5.2. Rapport C/N pour deux zones hydromorphes chiliennes sur la Cordillère des Andes et sur la Cordillère de la Côte (Donoso, 1992).

Tableau 5.3. Rapport C/N par type d'usage, zone de Las Cardas.

Tableau 5.4. Valeurs de R400* de la MO des sols de la zone de Las Cardas.

Tableau 5.5. Carbone organique total (COT) sous les trois modes d'usage pour la zone de Las Cardas. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

Tableau 5.6. Données quantitatives (COT, Stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de deux secteurs sous deux modes d'usage différents à Talhuén.

Tableau 5.7. Valeurs de R400* de la MO des sols de la zone de Talhuén.

Tableau 5.8. Carbone organique total (COT) sous les deux modes d'usage pour la zone de Talhuén. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

Tableau 5.9. Données quantitatives (COT, stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de deux secteurs sous deux modes d'usage différents à Flor del Norte.

Tableau 5.10. Proportion de carbone labile libérée entre 200 et 400°C (R400) pour la zone de Flor del Norte.

Tableau 5.11. Carbone organique total (COT) sous les deux modes d'usage pour la zone de Flor del Norte. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

Tableau 5.12. Données quantitatives (COT, Stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) d'un secteur de vignoble à Camarico.

Tableau 5.13. Proportion de carbone labile est non labile libéré entre 200 et 400°C (R400) pour la zone de Camarico.

Tableau 5.14. Carbone organique total (COT) sous usage intensif pour la zone de Camarico. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

Tableau 5.15. Données quantitatives (COT, Stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de deux secteurs sous deux modes d'usage différents à El Palqui.

Tableau 5.16. Proportion de carbone labile est non labile libéré entre 200 et 400°C (R400) pour la zone d'El Palqui.

Tableau 5.17. Carbone organique total (COT) sous usage intensif pour la zone d'El Palqui.

Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

Tableau 5.18. Données quantitatives (COT, stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de trois secteurs sous trois modes d'usage différents à San Pedro de Pichasca.

Tableau 5.19. Proportion de carbone labile libérée entre 200 et 400°C (R400) pour la zone de San Pedro de Pichasca.

Tableau 5.20. Carbone organique total (COT) sous les trois modes d'usage pour la zone de San Pedro de Pichasca. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

Tableau 5.21. Données quantitatives (COT, stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de trois secteurs sous trois modes d'usage différents à Las Ramadas.

Tableau 5.22. Proportion de carbone labile libérée entre 200 et 400°C (R400) pour la zone de Las Ramadas.

Tableau 5.23. Carbone organique total (COT) sous les trois modes d'usage pour la zone de Las Ramadas. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

CHAPITRE VI: MODELISATION DES STOCKS DE CARBONE

Tableau 6.1. Stock de carbone organique total (SCOT) sous les trois modes d'usage pour la zone de Las Cardas. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

Tableau 6.2. Stock de carbone organique total (SCOT) sous les trois modes d'usage pour la zone intermédiaire. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

Tableau 6.3. Stock de carbone organique total (SCOT) sous les trois modes d'usage pour la zone de Las Ramadas. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION

Tableau 7.1. Évolution des teneurs en argiles et ses rapports moyens surface-profondeur sur un gradient ouest-est, région de Coquimbo, Chili.

ANNEXE

ARTICLE

RESEARCH

STOCK OF SOIL ORGANIC CARBON IN ARID SOILS OF THE COQUIMBO REGION (CHILE): CONSEQUENCES OF GOAT GRAZING

Gerardo Soto^{1,2}, Ary Bruand^{2*}, Jean-Robert Disnar², Pablo Álvarez³, Audrey Gallaud²

¹ Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santa Rosa 11315, 8820808 – La Pintana, Santiago, Chile.

² Université d'Orléans, CNRS/INSU, Université François Rabelais – Tours, Campus Géosciences, 1A rue de la Férollerie, 45071 Orléans Cedex 2, France.

³ Universidad de La Serena, Campus Limarí, Av. La Paz 1108, 1842646 – Ovalle, Chile.

E-mail Ary.Bruand@univ-orleans.fr

*Corresponding author

ABSTRACT

The paper reports the effects of goat grazing on the soil organic carbon stock in the experimental station of Las Cardas. The soils are classified as Typic Haplodurids (US Soil taxonomy). Three treatments were selected for study: native vegetation (NV), moderate grazing (MG) and intensive grazing (IG). Three pits were studied under NV, four under MG and three under IG. We measured the particle size-distribution, the stone content and the cation exchange capacity (CEC). We measured the organic carbon content (OCC) in the 0-5 and 5-10 cm layer and then every 10 cm down to 100 cm deep. Results showed that the soils were sandy loam textured with a relatively CEC with respect to the clay content. The OCC in the 0-5 cm topsoil ranged from 6.1 to 11.8 g·kg⁻¹ under NV, from 2.8 to 13.4 g·kg⁻¹ under MG and from 4.7 to 8.0 g·kg⁻¹ under IG. The total organic carbon stocks (TOCS) ranged from 31.1 to 42.6 Mg·ha⁻¹ under NV, from 24.3 to 29.3 Mg·ha⁻¹ under MG and from 10.2 to 15.5 Mg·ha⁻¹ under IG. Statistical analysis of the averaged total stocks showed significant difference (P=0.95) between the three treatments, grazing affecting mainly the organic stock within the 0-30 cm topsoil because of its consequences on the production of litter and roots. Finally, our results showed the possibility to predict the TOCS by using the stock of soil organic carbon within the 0-30 cm topsoil alone with a satisfactory prediction quality, the bias was less than 0.1 Mg·ha⁻¹ and the precision equaled to 3.6 Mg·ha⁻¹.

Key words: bulk density, prediction, bias, precision

TÍTULO EN ESPAÑOL:

Stock del carbono orgánico en los suelos áridos de la región de Coquimbo (Chile): consecuencias del pastoreo caprino.

RESUMEN

Este trabajo trata sobre el efecto del pastoreo caprino sobre el stock del carbono orgánico del suelo en la estación experimental de las Cardas. El suelo está clasificado como Typic Haplodurids (US Soil taxonomy). Tres tratamientos fueron seleccionados: vegetación nativa (NV), pastoreo moderado (MG) y pastoreo intensivo (IG). Tres perfiles fueron estudiados bajo NV, cuatro bajo MG y tres bajo IG. Se midió la textura, el contenido de grava, la capacidad de intercambio catiónico (CEC). El contenido de carbono orgánico (OCC) fue medido en los horizontes de 0-5 y 5-10 cm, y luego cada 10 cm hasta 100 cm de profundidad. Los resultados arrojaron que los suelos son de textura Franco-arenosa con una CEC relacionada con el contenido de arcilla. El OCC de 0-5 cm varía entre 6.1 a 11.8 g·kg⁻¹ bajo NV, de 2.8 a 13.4 g·kg⁻¹ bajo MG y entre 4.7 a 8,0 g·kg⁻¹ bajo IG. El stock total de carbono (TOCS) varía entre 31.1 a 42.6 Mg·ha⁻¹ bajo NV, entre 24.3 a 29.3 Mg·ha⁻¹ bajo MG y entre 10.2 a 15.5 Mg·ha⁻¹ bajo IG. El análisis estadístico de medias de los stocks totales muestra una diferencia significativa ($P=0.95$) entre los tres tratamientos, siendo más fuertemente afectado por el pastoreo el horizonte de 0-30 cm debido a la alteración en la producción de hojarasca y de raíces. Finalmente los resultados muestran la predicción del TOCS en función del stock entre 0-30 cm con un desvío inferior a 0.1 Mg·ha⁻¹ y una precisión igual a 3.6 Mg·ha⁻¹.

Palabras clave: densidad aparente, predicción, desvío, precisión

INTRODUCTION

The soils represent the largest pool of the terrestrial organic carbon in the biosphere, (Jobbágy and Jackson, 2000). The total soil carbon pool for the entire land areas in the world was estimated as being equal to 2157 to 2293 Pg of C in the first meter from the surface (Batjes, 1996). Among that total soil carbon pool, the soil organic carbon (SOC) pool would represent 684 to 724 Pg of C in the upper 30 cm, 1462 to 1548 Pg of C in the upper 100 cm, and 2376 to 2456 Pg of C in the upper 200 cm (Batjes, 1996). According to the IPCC (2001) estimate, the total carbon pool for the land areas would be 1750 ± 250 Pg with 835 Pg of inorganic carbon.

The variation of the SOC stock was studied in many climatic areas (e.g. Bernoux *et al.*, 1998; Batjes, 2000; Arrouays *et al.*, 2001; Scott, *et al.*, 2002; Asner *et al.*, 2003; Lemenih and Itanna, 2004). However, in arid and semi-arid regions, studies of the SOC stock according to the soil usage are scarce. Hernanz *et al.*, (2002) studied the effects of long-term tillage systems and rotations on the SOC stock under semi-arid Mediterranean climatic conditions in central Spain and recorded an averaged SOC stock of $40 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ to a depth of 40 cm. Shrestha and Stahl (2008) analyzed the SOC storage in the semi-arid sagebrush steppe of Wyoming USA and recorded a stock ranging from 5.8 to $15.7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of C according to the grazing regime in the top 15 cm layer. Feng *et al.*, (2002) assessed the SOC stock in arid areas of China and found between 1.7 and $14.8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ in the Junggar Basin and between 0.6 and $20.1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ in the Tarim Basin according to the intensity of desertification. Singh *et al.*, (2007) estimated the SOC stock in arid and semi-arid region in Rajasthan, India and found 2.3 Pg in the 0 – 100 m in soil depth.

In southern America arid areas are characterized by a lack of data about the SOC stock although they represent $445,000 \text{ km}^2$ (Reynolds, 2001). Moreover, we have also a lack of information about the consequences on the SOC stock of grazing that is a common farming practice. In that context, the aim of this paper is to discuss the SOC stock in soil located in an arid area of South America (Coquimbo region, Chile) and to analyze how grazing practices affect the SOC stock.

THE STUDY SITE

The study site is part of the experimental station of Las Cardas that belongs to the University of Chile (Casanova, 1995). It is located in the Coquimbo region (29° 00' S; 32° 10' S) that corresponds to an arid zone of northern Chile of about 40,462 km² (Sánchez and Morales, 1998). The Coquimbo region is one of the 25 areas with the greatest biodiversity in the world. The vegetation is composed of 1,478 native species and 244 introduced species. The dominant species are perennial herbaceous (45 %), then shrubs (27 %) and finally annual and bi-annual herbaceous (23%) species (Squeo *et al.*, 2001).

The study site of Las Cardas is 23 km east of coast at an elevation of about 210 m. The mean annual rainfall and temperature are 100 mm and 16.5 °C, respectively (González *et al.*, 2001). The vegetation is dominated by sclerophyte shrubs and summer deciduous species, associated to herbaceous rangeland (native pasture) and cactaceae in north exposition alone. The dominant species are xerophytes shrubs like Alcaparra (*Senna cumingii* (Hook. et Arn.) H.S Irwin et Barneby), Cuerno de Cabra (*Haplopappus foliosus* (D.C)), Quisco (*Echinopsis chilensis* (Colla) Friederich et G.D. Rowley), Pichanilla (*Gutierrezia resinosa* (Hook. Et Arn). S.F.Blake), Incienso (*Flourensia thurifera* (Molina) DC.), Chilco (*Baccharis linearis* (Ruiz et Pav.) Pers.), and Cardón (*Puya chilensis* Molina) (Lailhacar, 1985). The soils are classified as Typic Haplodurids according to the US Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) (Aburto, 2008) (Figure 1).

METHODS

Three treatments in the experimental site were selected for study: native vegetation, moderate goat grazing (6 small ruminants units per hectare and year, i.e. 6 SRU·ha⁻¹·year⁻¹) since 1973 after native vegetation, intensive grazing (10 SRU·ha⁻¹·year⁻¹) since 1973 following native vegetation. Three pits were studied under native vegetation, four under moderate grazing and finally three under intensive grazing.

In every pit, we identified the different horizons and quantified roughly both their stone and gravel content by using the page available for surface area proportion estimation in Color Munsell Chart (2000). In every horizon, we measured the bulk density on 5 to 7 undisturbed clods 5 to 10 cm³ in volume by using the kerosene method (Assouline *et al.*, 2000). We also collected the <2 mm material in the different horizons

for physico-chemical determinations. The particle size distribution was measured using the pipette method after pre-treatment of samples with peroxide and sodium hexametaphosphate (Halitim *et al.*, 1984). The cation exchange capacity (CEC_e , in $\text{cmol}_+\cdot\text{kg}^{-1}$ of oven dried soil) was measured using the cobalt-hexamine trichloride method (Ciesielski and Sterckeman, 1997). We collected specifically <2 mm material at 0-5 cm and 5-10 cm depth, and then every 10 cm down to 100 cm depth for total organic carbon content determination by using the Rock-Eval method (Disnar *et al.*, 2003).

RESULTS AND DISCUSSION

Mineral composition and bulk density

The coarse fragment contents ranged roughly between 0.03 and 0.80 $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$. The sand content of the <2 mm material ranged from 415 to 874 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ but only from 587 to 743 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ in the top horizon. As for the clay content of the <2 mm material, it ranged from 41 to 335 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ but only from 61 to 94 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ in the top horizon (Table 1). The particle size distributions recorded corresponded to a sandy loam texture according to the Soil Survey Staff (1993). The cation exchange capacity ranged from 6.7 to 33.5 $\text{cmol}_+\cdot\text{kg}^{-1}$ and was closely related to the clay content ($r^2 = 0.88$) (Figure 2). We assumed that the contribution of the organic matter to the cation exchange capacity was negligible compared to the contribution of the clay material. Thus, for every horizon with a clay content > 100 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ to avoid consequences of the precision on the clay content determination, we calculated the cation exchange capacity of the clay material (CEC_{cl} , in cmol_+ per kg of oven-dried clay material) as follows:

$$CEC_{cl} = (CEC_e / CEC_{cl}) \times 1000 \quad (1)$$

Results showed that CEC_{cl} ranged from 70.2 to 141.0 $\text{cmol}_+\cdot\text{kg}^{-1}$ which should correspond to clay material with high smectite content, as earlier shown by Flores (1983) in similar soils. High CEC_{cl} was also recorded recently for soils of the Las Cardas area by Aburto *et al.*, (2008) with $92.9 \leq CEC_{cl} \leq 101.3$ $\text{cmol}_+\cdot\text{kg}^{-1}$.

The bulk density (D_b) ranged between 1.47 and 2.19 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ and was not measured in several horizons because of the too high coarse fragment content. The high D_b were related to the very high coarse sand

content. Aburto *et al.*, (2008) measured Db varying from 1.60 to 2.02 in a soil located in the Las Cardas area.

Organic carbon content

The organic carbon content of the <2mm material in the 0-5 cm topsoil ranged from 6.1 to 11.8 g·kg⁻¹ under native vegetation, from 2.8 to 13.4 g·kg⁻¹ under moderate grazing and from 4.7 to 8.0 g·kg⁻¹ under intensive grazing in the top horizon (Figure 3). The organic carbon content decreased roughly regularly with depth in every pit. The decrease in the organic carbon content was sharper under intensive grazing than under moderate grazing and between the latter and native vegetation.

Organic carbon stock

The organic carbon stock (OCS in Mg·ha⁻¹) was computed for every soil layer as follows:

$$OCS = 100 \times T_i \times OC_i \times D_{bi} \times CF_i \quad (1)$$

with T_i the thickness of the layer i in cm, OC_i the organic carbon content of the layer i in g·g⁻¹, D_{bi} the bulk density of the layer i in g·cm⁻³ and CF_i the proportion of coarse fragment of the layer i . The averaged curves of the organic carbon stock according to the treatment showed that the organic carbon stock would be affected at all the depths studied (Figure 4) The total organic carbon stock (TOCS in Mg·ha⁻¹) of every soil studied was then computed as follows:

$$TOCS = 100 \times \left[\sum_n (T_i \times OC_i \times D_{bi} \times CF_i) \right] \quad (2)$$

The TOCS ranged from 31.1 to 42.6 Mg·ha⁻¹ under native vegetation, from 24.3 to 29.3 Mg·ha⁻¹ under moderate grazing and from 10.2 to 15.5 Mg·ha⁻¹ under intensive grazing (Table 2). The TOCS was respectively 27 % and 64 % smaller under moderate and intensive grazing than under native vegetation. The TOCS recorded under native vegetation were similar to those recorded in semi-arid environments in central Spain (Hernandez *et al.*, 2002) and greater than those recorded in semi-arid environment in the US by Shrestha and Stahl (2008). We analyzed the data by applying the Fisher test to the averaged TOCS computed for each treatment. The results showed that the TOCS were significantly different between the three treatments ($P = 0.95$).

The organic carbon stock was computed also for the 0-30 cm topsoil and 30-100 cm subsoil to discuss the origin of TOCS difference recorded between native vegetation and grazing. The organic carbon stock between 0 and 30 cm depth ranged from 19.4 to 26.3 Mg·ha⁻¹ under native vegetation, from 12.2 to 22.9 Mg·ha⁻¹ under moderate grazing and from 8.1 to 10.9 Mg·ha⁻¹ under intensive grazing (Table 2). The results showed that the organic carbon stocks recorded for the three treatments were significantly different (P=0.95). On the other hand, the organic carbon stock between 30 and 100 cm depth ranged from 11.7 to 16.2 Mg·ha⁻¹ under native vegetation, from 6.4 to 12.6 Mg·ha⁻¹ under moderate grazing and from 2.1 to 5.8 Mg·ha⁻¹ under intensive grazing (Table 2). The statistical analysis showed that the organic carbon stock was significantly different between native vegetation and the two other treatments (P=0.95) and not significantly different between moderate and intensive grazing (P=0.95).

Thus, our results showed that within the last 35 years grazing has affected the OCS in the soils studied and differently according to the grazing rate. This would be related to an overgrazing in the moderate and intensive grazing treatment with no significant difference between these treatments when the TOCS are compared. González *et al.*, (2001) showed indeed that the mean carrying capacity of the sector was 0.25 SRU·ha⁻¹·year⁻¹ and thus much smaller than the 6 SRU·ha⁻¹·year⁻¹ of the moderate grazing treatment. However, the results showed also that the organic carbon stock between 0 and 30 cm depth corresponds to 62 and 61 % of the TOCS under respectively native vegetation and moderate grazing when it corresponds only to about 69 % of the TOCS under intensive grazing. Moreover, the organic carbon stocks within the 0-30 cm topsoil appeared to be significantly different (P=0.95) between the three treatments, thus indicating that the grazing rate affects differently the production of litter, roots and exudates between moderate and intensive grazing. Moderate grazing would affect the litter, root and exudates production but without affecting the respective proportion of organic carbon stock between 0 and 30 cm depth and between 30 and 100 cm depth compared to the proportion recorded under native vegetation. On the other hand,, intensive grazing affected more strongly the TOCS than moderate grazing, led to a change in the proportion of the organic carbon stock between 0 and 30 cm depth on one hand and between 30 and 100 cm on the other. This would be related to a decrease in the vegetation that was replaced partially year after year.

Prediction of the total organic carbon stocks

The study of TOCS required digging a pit because of the high stone content that prevented to use an auger to sample the soil. Because this was time consuming and quite hard work, we studied the possibility to predict the TOCS with the organic carbon stock of the topsoil alone. We thus analyzed the relationship

between the organic carbon stock within the 0-30 cm topsoil and the TOCS on one hand, and within the 0-20 cm topsoil and the TOCS on the other hand. Prediction with the stock present in the 0-20 cm topsoil is indeed easier than with the one present in the 0-30 cm topsoil. As expected, the results showed that the organic carbon stock within the 0-30 cm topsoil was more closely related with the TOCS ($R^2 = 0.89$) than the 0-20 cm topsoil with the TOCS ($R^2 = 0.76$). The consequences of that difference of closeness on the TOCS prediction quality was studied by predicting the TOCS of one of the ten soils studied with the linear relationship established with the nine remaining soils. This was performed ten times by predicting the TOCS for one soil different each time. The comparison of the measured TOCS with the predicted ones showed clearly a better prediction of the TOCS when the organic carbon stock within the 0-30 cm topsoil was used than with the organic carbon stock within the 0-20 cm topsoil (Figure 5).

To discuss the validity of the prediction, the root mean square error (RMSE) was computed using:

$$RMSE = \left[\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{i=10} (TOCS_{p,i} - TOCS_{m,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

where $TOCS_{p,i}$ is the predicted TOCS for the soil i , $TOCS_{m,i}$ is the measured TOCS of the soil i . Although $RMSE$ is commonly used to discuss prediction quality (e.g. Wösten *et al.*, 2001; Schaap, 2004), it varies according to both the overall prediction bias and the overall prediction precision. To determine the prediction bias and prediction precision, separately, we computed the mean error of prediction (MEP) and the standard deviation of prediction (SDP) using (Bruand *et al.*, 2003):

$$MEP = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{i=10} (TOCS_{p,i} - TOCS_{m,i}) \quad (4)$$

$$SDP = \left\{ \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{i=10} [(TOCS_{p,i} - TOCS_{m,i}) - MEP]^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

The MEP measures the bias and indicates whether the TOCS is overestimated (positive) or underestimated (negative), on average, whereas SDP measures the precision of the prediction.

The results showed that the RMSE recorded with the prediction using the organic carbon stock within the 0-20 cm topsoil and the 0-30 cm topsoil were 5.6 and 1.1 Mg·ha⁻¹, respectively. Such results show a much better prediction of the TOCS with the organic carbon stock within the 0-30 cm topsoil than with the organic carbon stock within the 0-20 cm topsoil. This difference of prediction quality is related to a difference of bias and precision of the prediction. The TOCS was indeed much less overestimated with the organic carbon stock within the 0-30 cm topsoil (MEP < 0.1 Mg·ha⁻¹) than with the organic carbon stock within the 0-20 cm topsoil (MEP = 0.2 Mg·ha⁻¹). The precision was on the other hand much greater with the organic carbon stock within the top 0-30 cm topsoil (SDP = 3.6 Mg·ha⁻¹) than with the organic carbon stock within the 0-20 cm topsoil (SDP = 5.8 Mg·ha⁻¹).

CONCLUSION

Our results showed that goat grazing as applied in the two treatments studied strongly decreases the stock of soil organic carbon. They showed a significant difference between moderate and intensive grazing, the two grazing rates being over the carrying capacity of the arid studied. Further work will focus on the effect of grazing practices close to the theoretical carrying capacity of the area studied. Our results showed also that the difference of total organic carbon stock is mainly related to the difference of organic carbon stock in the 0-30 cm topsoil because of a smaller production of litter and roots when increasing grazing rate. Finally, we showed the possibility to predict the total stock of soil organic carbon by using the stock of soil organic carbon within the 0-30 cm topsoil alone with a relatively satisfactory prediction quality. This will enable the estimation of the total stock of soil organic carbon in similar areas by avoiding digging pits which restricts to increase the number of the soils sampled at the scale of the landscape.

LITERATURE CITED

- Aburto, F., C. Hernández, M. Pfeiffer, M. Casanova, and W. Luzio. 2008. Northern field-guide between 30° S and 33° 30' S, p. 76, In M. Casanova and W. Luzio, eds. The international conference and field workshop on soil classification. Soil: A work of art of Nature. Universidad de Chile, Santiago, Ovalle and Tongoy, Chile.
- Arrouays, D., W.D., V. Badeau,. 2001. The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. *Soil Use and Management* 17:7-11.
- Asner, G.P., S. Archer, R.F. Hughes, R.J. Ansley, and C.A. Wessman. 2003. Net changes in regional woody vegetation cover and carbon storage in Texas Drylands, 1937-1999. *Global Change Biology* 9:316-335.
- Assouline, S., D. Tessier, and A. Bruand. 2000. A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resources Research* 36:3769-3769.
- Batjes, N.H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soil of world. *European Journal of Soil Science* 47:151-163.
- Batjes, N.H. 2000. Effects of mapped variation in soil conditions on estimates of soil carbon and nitrogen stocks for South America. *Geoderma* 97:135-144.
- Bernoux, M., D. Arrouays, C. Cerri, P.M. De Alencastro Graça, B. Volkoff, and J. Trichet. 1998. Estimation des stocks de carbone des sols du Rondônia (Amazonie Brésilienne). *Étude et Gestion des Sols*. 5:pp 31-42.
- Bruand, A., P. Pérez Fernández, and O. Duval. 2003. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use and Management* 19:232-242.
- Ciesielski, H., and T. Sterckeman. 1997. Determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils by means of cobalt hexamine trichloride. Effects of experimental conditions. *Agronomie* 17:1-7.
- Color, M. 2000. Munsell soil color charts.
- Disnar, J.R., B. Guillet, D. Keravis, C. Di-Giovanni, and D. Sebag. 2003. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitations. *Organic Geochemistry* 34:327-343.
- Feng, Q., K.N. Endo, and C. Guodong. 2002. Soil carbon in desertified land in relation to site characteristics. *Geoderma* 106:21-43.

284 Flores, R. 1983. Pedogénesis de cuatro Aridisols en el secano costero de la IV Región de Chile. 61 p.
 285 Tesis de Licenciado en Ciencias Agrícolas. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias,
 286 Veterinarias y Forestales. Santiago, Chile.

287 González, C., F. Santibáñez, and G. Soto, (eds.) 2001. Compendio de información ambiental,
 288 socioeconómica y silvoagropecuaria de la IV región de Coquimbo, pp. 1-120. INDAP-PRODECOP and
 289 AGRIMED-Universidad de Chile, La Serena, Chile.

290 Halitim, A., M. Robert, D. Tessier, and R. Prost. 1984. Influence of Exchangeable Cations (Na, Ca, Mg)
 291 and Salt Concentration on the Physical-Properties (Water-Retention, Hydraulic Conductivity) of
 292 Montmorillonite. *Agronomie* 4:451-459.

293 Hernanz, J.L., R. López, L. Navarrete, and V. Sánchez-Girón. 2002. Long-term effects of tillage systems
 294 and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain. *Soil*
 295 *& Tillage Research* 66:129-141.

296 IPCC. 2001. Summary for policy makers, p. 944, In J. T. Houghton, Ding, Y., Griggs, D.J., Nougier, M.,
 297 Van der Liden, P.J., Xiaosu, D., ed. *The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third*
 298 *Assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press,
 299 Cambridge.

300 Jobbágy, E., and R. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to
 301 climate and vegetation. *Ecological Applications* 10:423 - 436.

302 Lailhacar, S. 1985. Las grandes formaciones vegetales de las zonas desérticas y mediterráneas perárida y
 303 árida de Chile : con énfasis en sus aptitudes forrajeras. *Boletín Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo*
 304 5:145-231.

305 Lemenih, M., and F. Itanna. 2004. Soil carbon stocks and turnovers in various vegetation types and arable
 306 lands along an elevation gradient in southern Ethiopia. *Geoderma* 123:177-188.

307 Reynolds, J.F. 2001. Desertification, p. 61-78, In S. Levin, (ed.) *Encyclopedia of Biodiversity*. Academic
 308 Press, San Diego, CA.

309 Sánchez, A., y R. Morales. 1998. Las regiones de Chile. *Espacio físico y humano-económico*. 2a ed.
 310 Editorial Universitaria., Santiago, Chile.

311 Schaap, M.G. 2004. Accuracy and uncertainty in PTF predictions, p. 33-43, In a. W. J. R. Y. Pachepsky,
 312 ed. *Developmennt of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*, Vol. Volume 30. Elsevier.

313 Scott, N.A., K.R. Tate, D.J. Giltrap, C. Tattersall Smith, H.R. Wilde, P.J.F. Newsome, and M.R. Davis.
 314 2002. Monitoring land-use change effects on soil carbon in New Zealand: quantifying baseline soil
 315 carbon stocks. *Environmental Pollution* 116:S167-S186.

316 Shrestha, G., and P.D. Stahl. 2008. Carbon accumulation and storage in semi-arid sagebrush steppe:
 317 Effects of long-term grazing exclusion. *Agriculture Ecosystems & Environment* 125:173-181.

318 Singh, S.K., A.K. Singh, B.K. Sharma, , and J.C.Tarafdar. 2007. Carbon stock and organic carbon
 319 dynamics in soils of Rajasthan, India. *Journal of Arid Environments* 68:408 - 421.

320 Squeo, F.A., G. Arancio, C. Marticorena, M. Muñoz y J.R. Gutiérrez. 2001. Diversidad vegetal de la IV
 321 región de Coquimbo, Chile, p. 179-158, In F. A. Squeo, G. Arancio y J.R. Gutiérrez, ed. Libro Rojo de
 322 la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: región de Coquimbo. Ediciones
 323 Universidad de La Serena, La Serena, Chile.

324 Soil Survey Staff. 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture.
 325 Handbook 18, Washington D.C., USA.

326 Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting
 327 soil surveys. 2nd ed. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture.
 328 Agriculture Handbook 436.

329 Wösten, J.H.M., Y.A. Pachepsky, and W.J. Rawls. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between
 330 available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* 251:123-150.

Table 1. Basic characteristics of the soils studied.

Tabla 1. Características básicas de los suelos estudiados.

Pit	Depth	Color		Bulk density	Coarse fragment proportion	Particle-size distribution (mm)			Cation exchange capacity	
		Dry	Wet			<0.002	0.002-0.05	0.05-2		
	cm			g·cm ⁻³	cm ⁻³ ·cm ⁻³		g·kg ⁻¹		cmol _c ·kg ⁻¹	
Under native vegetation										
9	0 - 5	10YR 4/4	7.5YR 3/3	1.69	0.10	77	229	694	6.86	
	5 - 30	7.5YR 4/4	7.5YR 3/4	1.98	0.05	93	212	695	8.34	
	30 - 55	7.5YR 4/3	7.5YR 3/3	2.01	0.03	134	163	703	16.4	
	55 - 90	7.5YR 4/3	7.5YR 3/4	2.09	0.02	217	195	588	27.4	
	90 - 100	7.5YR 5/4	7.5YR 3/4	-	0.02	29	97	874	27.8	
12	0 - 5	7.5YR 5/4	7.5YR 3/4	1.85	0.05	90	256	654	7.19	
	5 - 20	7.5YR 4/4	7.5YR 3/3	1.56	0.05	115	236	649	9.16	
	20 - 57	7.5YR 4/6	7.5YR 3/4	2.05	0.25	170	219	611	13.7	
	57 - 100	7.5YR 5/4	7.5YR 3/4	2.04	0.10	214	232	554	24.0	
13	0 - 6	7.5YR 4/3	7.5YR 3/3	1.58	0.05	77	236	687	7.58	
	6 - 35	7.5YR 4/4	7.5YR 2.5/2	1.76	0.05	98	210	692	10.8	
	35 - 85	7.5YR 4/3	7.5YR 3/3	-	0.30	149	156	695	16.7	
	85 - 100	7.5YR 4/4	7.5YR 4/6	-	0.05	310	198	492	28.6	
Under moderate grazing										
1	0 - 5	10YR 4/4	7.5YR 3/2	1.47	0.03	94	252	654	7.35	
	5 - 12	10YR 4/4	10YR 3/3	1.73	0.03	88	227	685	7.28	
	12 - 40	10YR 3/4	7.5YR 3/3	1.73	0.03	93	229	678	8.82	
	40 - 100	10YR 3/6	7.5YR 3/3	1.99	0.03	170	239	591	14.2	
2	0 - 5	10YR 4/4	7.5YR 3/2	1.55	0.03	98	262	640	8.52	
	5 - 39	10YR 4/6	7.5YR 3/2	1.83	0.03	110	264	626	7.72	
	39 - 100	10YR 3/6	7.5YR 3/2	2.05	0.03	206	226	568	19.3	
4	0 - 7	10YR 4/4	7.5YR 3/2	1.52	0.08	80	276	644	7.73	
	7 - 24	7.5YR 4/3	7.5YR 3/2	1.77	0.03	75	233	692	7.84	
	24 - 45	10YR 4/6	7.5YR 3/2	1.77	0.15	83	217	700	10.4	
	45 - 77	10YR 3/4	7.5YR 3/2	1.87	0.50	83	185	732	11.7	
	77 - 100	10YR 5/4	7.5YR 3/3	2.05	0.00	77	221	702	21.8	
6	0 - 5	7.5YR 4/6	7.5YR 2.5/3	1.64	0.05	-	-	-	-	
	5 - 35	7.5YR 4/6	7.5YR 3/3	2.05	0.03	-	-	-	-	
	35 - 60	7.5YR 3/3	7.5YR 2.5/3	-	0.25	-	-	-	-	
	60 - 100	7.5YR 4/4	7.5YR 4/3	-	0.03	-	-	-	-	
Under intensive grazing										
5	0 - 10	10YR 4/4	7.5YR 2.5/2	1.78	0.07	61	196	743	6.66	
	10 - 40	7.5YR 4/6	7.5YR 2.5/3	2.02	0.03	71	187	742	7.59	
	40 - 60	10YR 4/4	7.5YR 2.5/3	2.14	0.25	66	123	811	10.7	
	60 - 85	10YR 3/4	7.5YR 2.5/2	-	0.10	66	130	804	11.6	
	85 - 100	10YR 3/6	7.5YR 4/3	-	0.55	84	119	797	12.5	
7	0 - 5	7.5YR 4/6	7.5YR 3/4	1.68	0.05	84	329	587	6.75	
	5 - 35	7.5YR 4/4	7.5YR 4/3	1.88	0.70	109	244	647	9.58	
	35 - 50	7.5YR 4/6	7.5YR 3/3	2.08	0.15	120	236	644	13.8	
	50 - 80	7.5YR 4/3	7.5YR 3/4	2.19	0.02	335	250	415	33.5	
	80 - 100	7.5YR 4/2	7.5YR 3/2	2.05	0.02	41	226	733	23.3	
8	0 - 25	10YR 5/4	7.5YR 3/3	1.99	0.03	-	-	-	-	
	25 - 95	7.5YR 4/3	7.5YR 3/3	1.62	0.40	-	-	-	-	
	95 - 100	7.5YR 3/1	7.5YR 2.5/1	-	0.15	-	-	-	-	

Table 2. Organic carbon stock under the different treatments studied. Proportion of the total organic carbon stock between brackets.

Tabla 2. Stock de carbono orgánico del suelo bajo los diferentes tratamientos estudiados. Proporción del carbono total orgánico entre

	<i>Organic carbon stock (Mg·ha⁻¹)</i>		
	<i>0-100 cm</i>	<i>0-30 cm</i>	<i>30-100 cm</i>
<i>Native vegetation</i>			
<i>Pit 1</i>	31.1	19.4	11.7
<i>Pit 2</i>	42.6	26.3	16.2
<i>Pit 3</i>	37.7	23.3	14.4
<i>Average</i>	37.1	23.0 (62 %)	14.1 (38 %)
<i>Moderate grazing</i>			
<i>Pit 4</i>	29.1	17.2	11.9
<i>Pit 5</i>	29.3	22.9	6.4
<i>Pit 6</i>	24.3	12.2	12.1
<i>Pit 7</i>	26.2	13.6	12.6
<i>Average</i>	27.2 (73 %)*	16.5 (61 %)	10.7 (39 %)
<i>Intensive grazing</i>			
<i>Pit 8</i>	10.2	8.1	2.1
<i>Pit 9</i>	14.7	9.0	5.8
<i>Pit 10</i>	15.5	10.9	4.6
<i>Average</i>	13.5 (36 %)*	9.3 (69 %)	4.2 (31 %)

*With respect to the total organic carbon stock under native vegetation

Soils map of Coquimbo region, Chile.

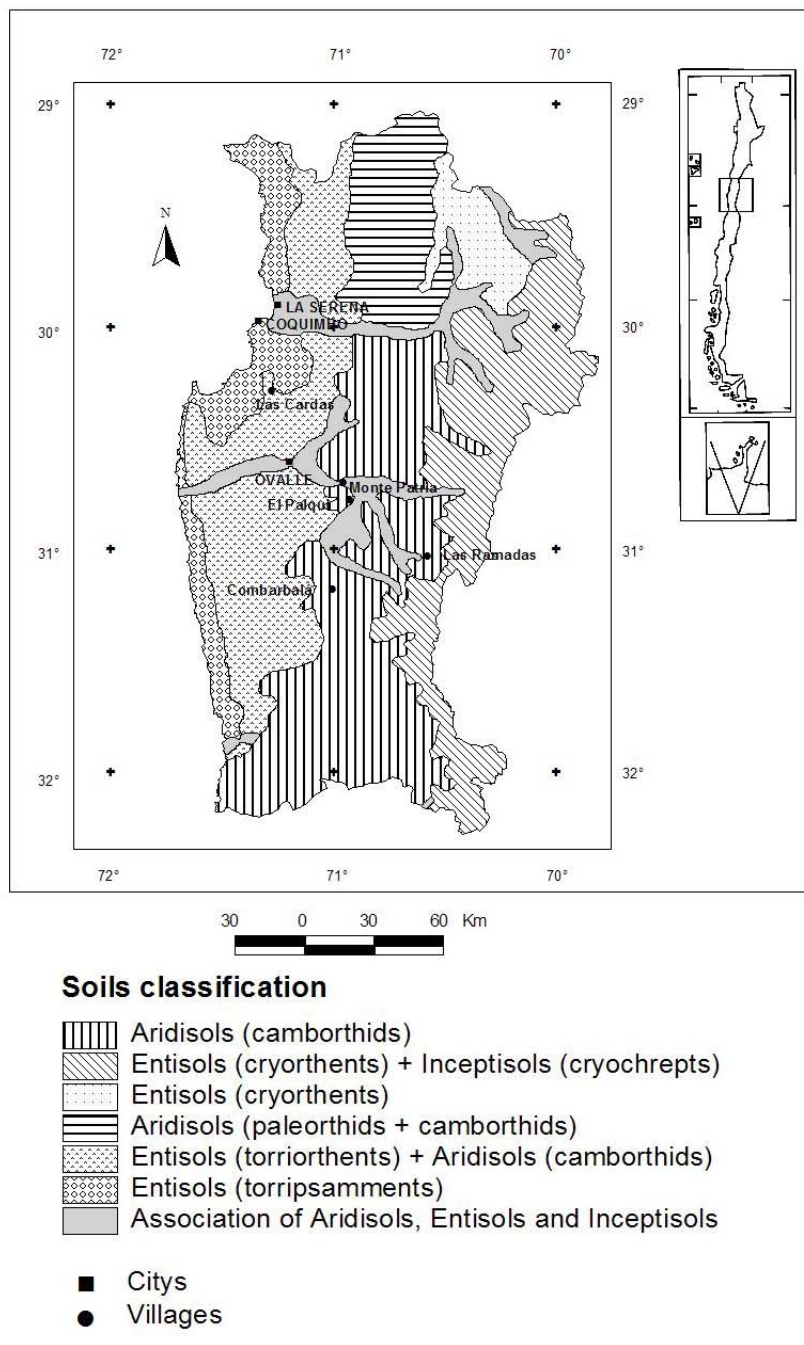


Figure 1. Location of the Las Cardas study site and soil distribution in the Coquimbo region (modified after Alcayaga and Luzio, 1986).

Figura 1. Localización del sitio de estudio Las Cardas, y distribución de los suelos en la región de Coquimbo (modificado por Alcayaga and Luzio, 1986).

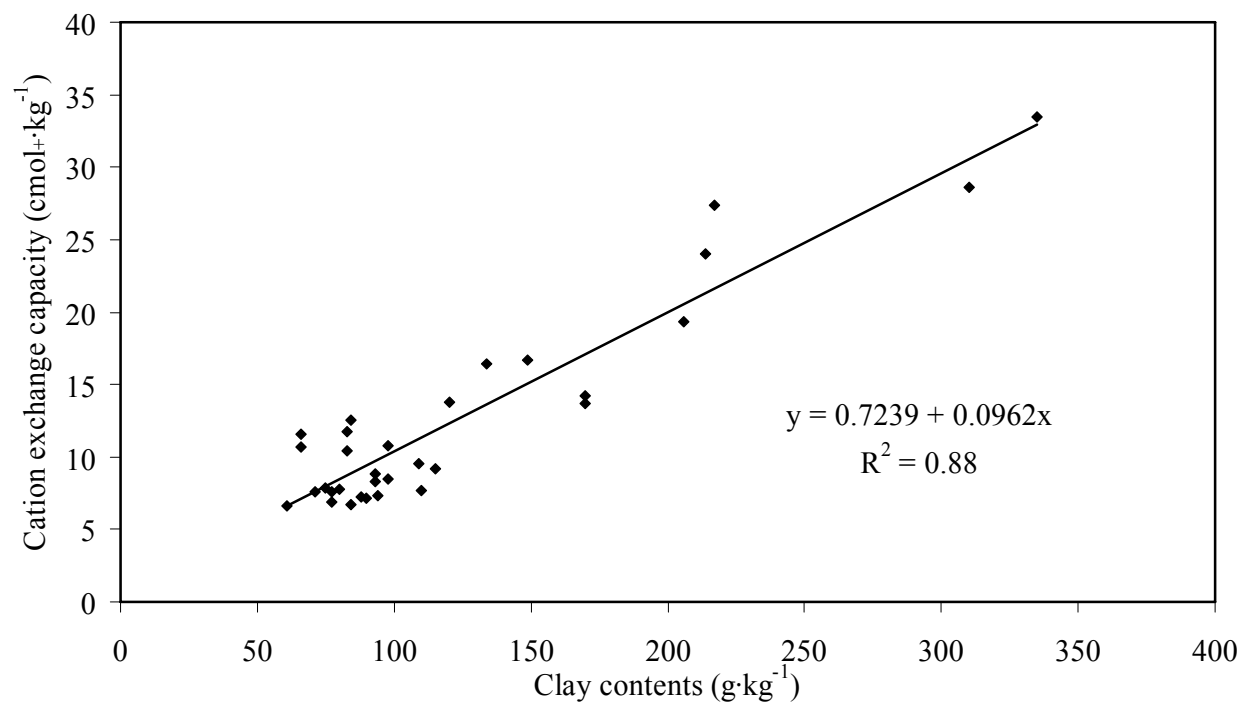
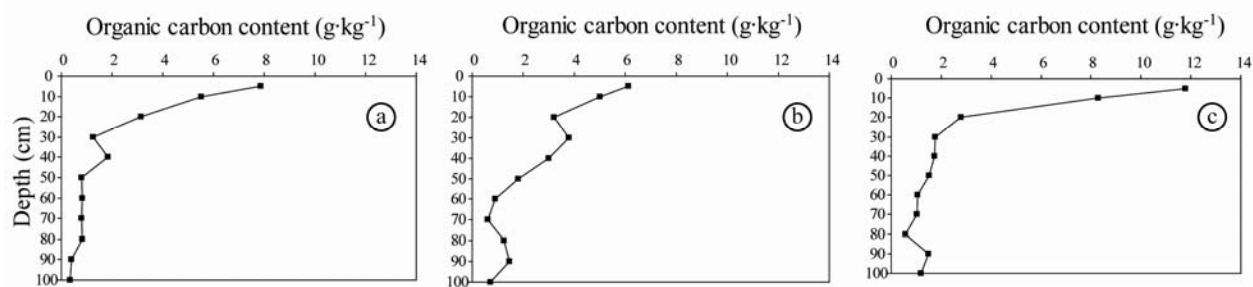


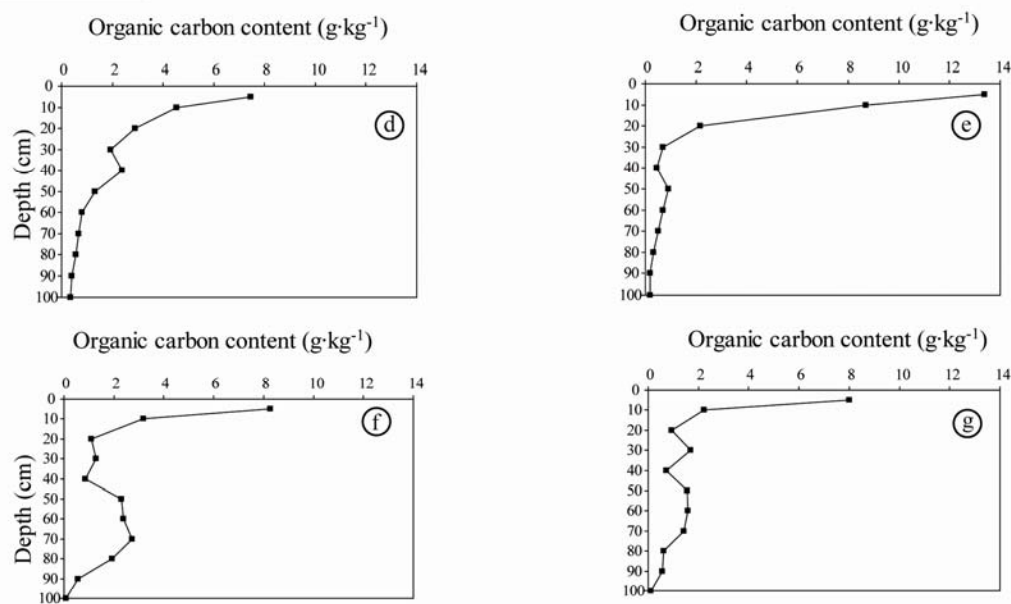
Figure 2. Relation between the clay contents and the cation exchange capacity of soils studied.

Figura 2. Relación entre el contenido de arcilla y la capacidad de intercambio catiónico del suelo estudiado.

Native vegetation



Moderate grazing



Intensive grazing

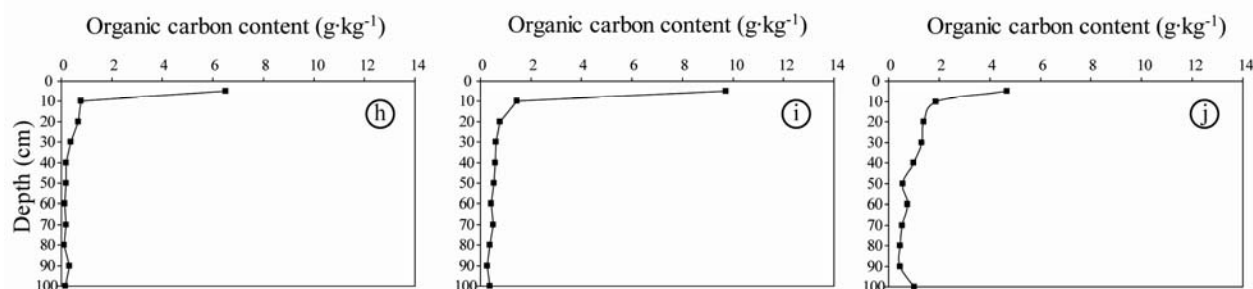


Figure 3. Distribution with depth of the organic carbon content under the different treatments studied: native vegetation (a, b and c), moderate grazing (d, e, f and g) and intensive grazing (h, i and j).

Figura 3. Distribución en profundidad del contenido de carbono orgánico bajo los tratamientos estudiados: vegetación nativa (a, b, c), pastoreo extensivo (d, e, f, g) y pastoreo intensivo (h, i, j).

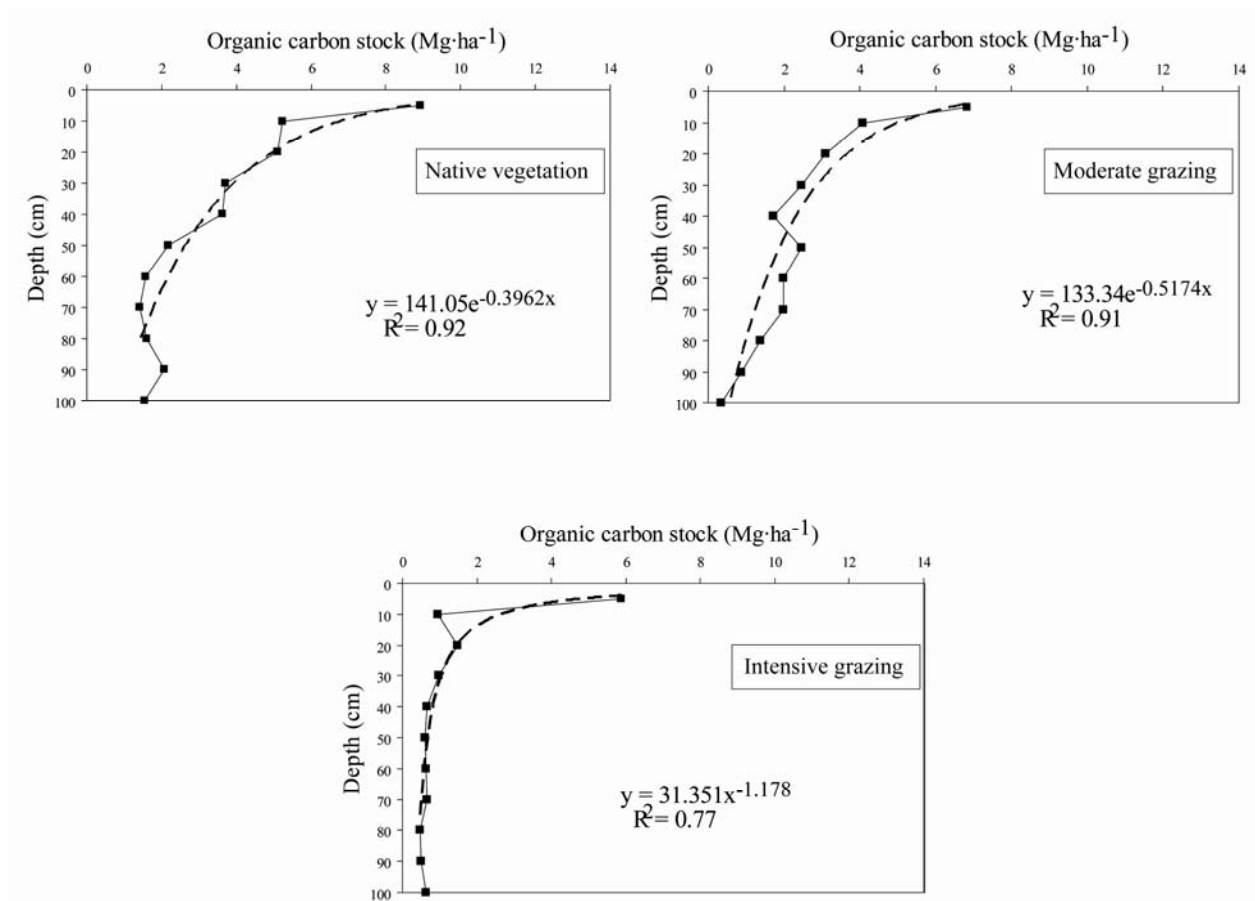


Figure 4. Distribution of the mean organic carbon stock with depth under native vegetation, moderate grazing and intensive grazing.

Figura 4. Distribución en profundidad del stock medio de carbono orgánico bajo vegetación nativa, pastoreo extensivo y pastoreo intensivo.

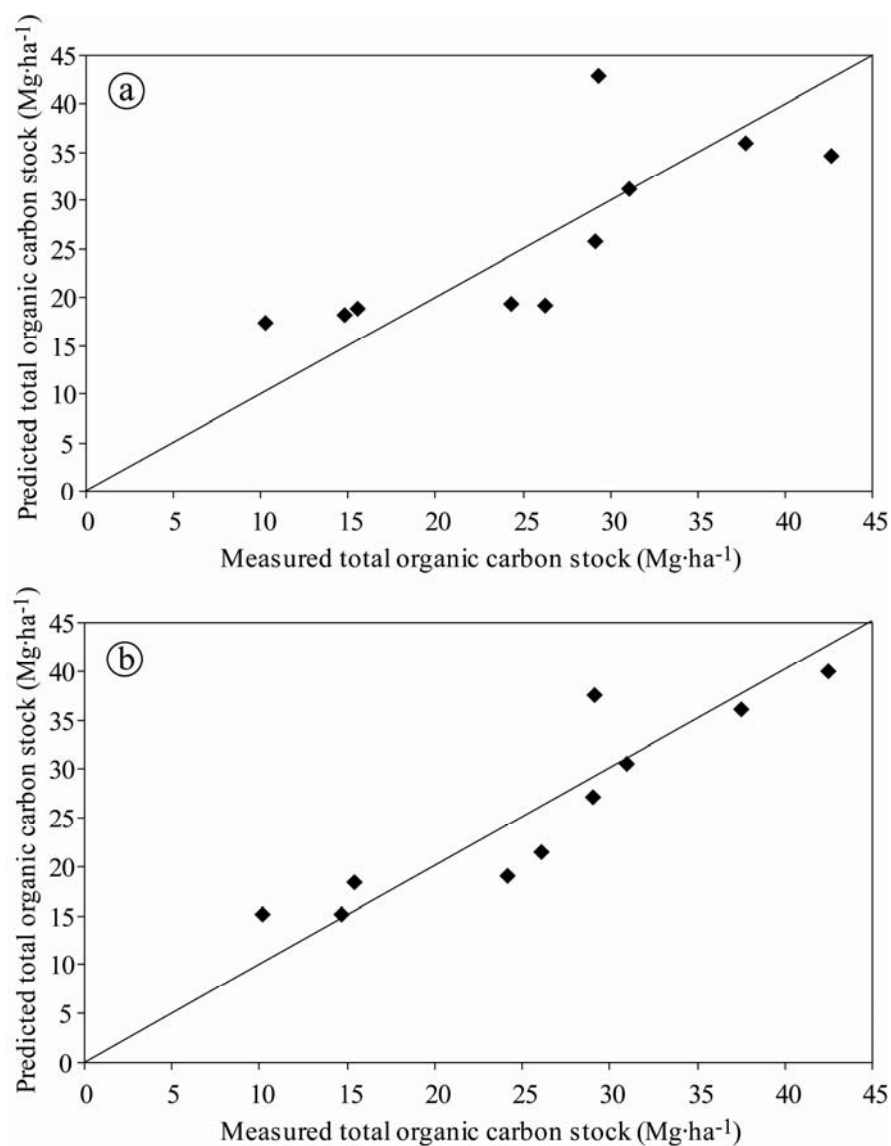


Figure 5. Comparison between the measured total organic carbon stock (Mg·ha⁻¹) and the predicted total organic carbon stock (Mg·ha⁻¹) by using the organic carbon stock within the 0-20 cm topsoil (a) and the 0-30 cm topsoil (b).

Figura 5. Comparación entre el stock de carbono orgánico medido (Mg·ha⁻¹) y el stock de carbono orgánico estimado (Mg·ha⁻¹) utilizando el stock a 20 cm (a) y a 30 cm de profundidad (b).

Gerardo SOTO M.

**Statut organique des sols en milieu aride : étude de la région
de Coquimbo (Chili).**

Du fait de son climat aride (70 mm de précipitations/an), la région de Coquimbo au Chili (30^a de lat. sud), concentre des contrastes extrêmes d'ordre environnemental comme sur le plan social avec la coexistence de trois types de milieux très contrastés : a) un secteur agricole irrigué, moderne et ouvert aux marchés internationaux ; b) un secteur irrigué d'usage traditionnel ; c) un secteur non irrigué qui comprend des surfaces marginales et érodées. Cette région aride et donc particulièrement sensible à toute forme d'activité, n'a encore fait l'objet d'aucune étude susceptible d'aider à y appréhender l'impact d'une utilisation des sols comme d'un éventuel changement climatique. Dans ce contexte nous avons réalisé un inventaire des sols de la région de Coquimbo dans des secteurs d'usages et d'état de conservation différents. Nous avons notamment entrepris une étude quantitative et qualitative de la Matière Organique (MO) et de sa répartition dans les profils. A cette fin, 82 profils (1m de profondeur) ont été échantillonnés selon un transect altitudinal océan-Cordillère. Les prélèvements ont été effectués tous les 10 cm et ont fait l'objet des analyses suivantes : granulométrie, mesure de la densité apparente et de la Capacité d'Echange Cationique (CEC), détermination des teneurs en Carbone Organique Total (COT) ainsi que des indices d'hydrogène (IH) et d'oxygène (IO) de la MO (pyrolyse Rock-Eval). Les résultats indiquent une décroissance très rapide des teneurs et de la qualité de la MO avec la profondeur. Cependant, de très fortes différences s'observent entre sols non cultivés et cultivés, les seconds s'avérant beaucoup plus riches en MO que les premiers. En revanche, cette différence ne parait pas s'accompagner de changements notables de qualité de la MO ce qui souligne une transformation rapide, d'une part importante de la MO, héritée des végétaux cultivés.

Mots clés : aridisols, matière organique, carbone, zone aride.

**Soils organic status in arid land: study of the Coquimbo
region (Chile).**

Because of arid climate (70 mm precipitations/yr), the Coquimbo region, Chile, (30^aS), is the scene of environmental extreme contrasts. In fact, from a social point of view, this region shows the coexistence of three different kinds of arid lands : a) an irrigated agricultural sector, modern and open to international markets; b) an irrigated sector of traditional use; c) a non-irrigated sector consisting of sparse and eroded areas. The Coquimbo region is especially sensitive to any activities and has not been yet the object of studies to enhance the knowledge of the soil use impact or of the potential climatic variation. In this context, we sample several types of soil from different sectors of use and preservation of the Coquimbo region. We carried out quantitative and qualitative analyses of the Organic Matter (OM) and a study of its dispersion along the profiles. 82 soil profiles (1 m depth – sampling every each 10 cm) have been sampled along an altitudinal transect ocean-mountain. Granulometry, bulk density, Cationic Exchange Capacity (CEC), Total Organic Carbon content (TOC) and hydrogen (HI) – oxygen (OI) indices of the OM (by Rock-Eval pyrolysis) have been analyzed on samples. Results illustrate a rapid decrease with depth of the OM content and quality. However, distinctions are observed between non-cultivated and cultivated soils, the second one is OM richer than the first one. However, no major differences in OM are observed. It implies a rapid transformation of a noteworthy part of OM, acquired from cultivated vegetable.

Keywords : aridisols, organic matter, carbon, dry land.



UNIVERSIDAD DE CHILE