

Avaluació de la capacitat de segrest de carboni a un sòl restaurat amb fangs de depuradora: Estabilitat de la matèria orgànica

Projecte final de carrera presentat per: Carmen Rosa Medina Carmona[‡]

Tutor del projecte: Oriol Ortiz i Perpiñà[§], professor Lector d'Edafologia
Llicenciatura de Ciències Ambientals - Universitat Autònoma de Barcelona

Juliol de 2010

Resum

L'avaluació de la capacitat de segrest de carboni d'un sòl denudat per l'extracció de calcàries i la seva posterior restauració amb fangs de depuradora s'ha realitzat mitjançant l'anàlisi de l'estabilitat de la matèria orgànica del sòl (MOS) en funció de la dosi de fangs aplicada. Els resultats d'aquest treball demostren dos fets fonamentals per a l'estudi de la capacitat de segrest de carboni, els qual són: *la conservació del contingut total de MOS i l'augment de la seva estabilitat fins a nivells més alts que els de la MOS de les parcel·les de control*. Aquests resultats són explicables per (i) la conservació i augment de la MOS recalcitrant, i (ii) la protecció d'una porció més o menys rellevant de la MO làbil continguda amb els fangs gràcies a l'acció simultània dels mecanismes d'estabilització de la MOS, com són: l'estabilització bioquímica (humificació), química, física, a més de la pròpia hidrofobicitat de la MOS, aquests dos últims potenciats per l'addició del fangs de depuradora.

Resumen

La evaluación de la capacidad de secuestro de carbono de un suelo degradado por la extracción de caliza y su posterior restauración con lodos de depuradora se ha realizado mediante el análisis de la estabilidad de la materia orgánica del suelo (MOS) en función de la dosis de lodos aplicada. Los resultados de este trabajo demuestran dos hechos fundamentales para el estudio de la capacidad de secuestro de carbono, estos hechos son: *la conservación de la cantidad total de MOS y el aumento de su estabilidad hasta niveles superiores a los de la MOS de las parcelas control*. Estos resultados son explicables por (i) la conservación y el aumento de la MOS recalcitrante, y (ii) la protección de una proporción más o menos relevante de la MOS lábil contenida en los lodos gracias a la acción simultánea de los mecanismos de estabilización, como son: la estabilización bioquímica (humificación), química, física y la propia hidrofobicidad de la MOS, estos dos últimos potenciados por la adición de los lodos de depuradora.

Abstract

The assessment of the C sequestration capacity of a degraded soil by the extraction of limestone and then restored with sewage sludge was conducted by analyzing the stability of the soil organic matter (SOM) based on the sludge dose. The results of this study highlight two fundamental facts for the study of carbon sequestration: *the conservation of the total SOM amount and an increase in its stability to levels higher than the SOM of the control soil*. These results can be explained by (i) the preservation or increase of the recalcitrant SOM, and (ii) the protection of a fraction more or less relevant of the labile SOM contained in the sludge thanks to the joint action of SOM stabilization processes such as: biochemical (humification), chemical, physical and also the hydrophobicity of the SOM, the two latter enhanced by the addition of sewage sludge.

Paraules claus: segrest de carboni, matèria orgànica, estabilitat, recalcitrància, mineralització.

1. Introducció

La dinàmica econòmica creixent de Catalunya durant els darrers anys ha propiciat el desenvolupament d'un gran nombre d'activitats extractives, que produeixen impactes sobre el medi que cal reparar. Aquest projecte se centra en els impactes sobre el sòl, i en la seva restauració mitjançant l'addició d'una esmena orgànica: els fangs de depuradora. Actualment s'està fomentant a Catalunya l'ús dels fangs de depuradora, ja que representa l'aprofitament d'un residu com a recurs, tancant el cicle de la matèria, tot i que poden ocasionar efectes negatius

[‡] Correu electrònic: la_tatamedina@yahoo.es

[§] Correu electrònic: joseporiol.ortiz@uab.cat

sobre el medi ambient si no hi ha un control dels seus atributs químics i si la seva aplicació no es duu a terme d'una forma adequada.

Cal tenir en compte que el sòl es considera un recurs no renovable a escala humana, i tot i així és un compartiment ambiental que socialment no rep tanta importància com la hidrosfera o a l'atmosfera. D'aquí la necessitat de minimitzar-hi els efectes negatius que es puguin derivar de les activitats humanes i de desenvolupar treballs que facin reflexionar sobre la complexitat del sòl i el seu paper en els cicles mediambientals.

L'interès en els fangs de depuradora rau, principalment, en la quantitat de matèria orgànica i nutrients que aporten al sòl. La matèria orgànica té una gran influència en el manteniment de la qualitat del sòl, i és imprescindible perquè es dugui a terme una bona regeneració de la zona afectada per l'activitat extractiva. La matèria orgànica es pot emmagatzemar al sòl gràcies a diferents mecanismes, com són l'estabilització bioquímica (humificació), química i física (Six et al., 2002; Lützow et al., 2006). La protecció d'aquest estoc edàfic de C, factor clau per a la conservació de la qualitat del sòl, és també una de les estratègies de lluita contra el canvi climàtic que es plantegen a tot el planeta. Cal tenir en compte, en aquest sentit, que a nivell mundial la reserva de C al sòl (2500 Pg) és molt major que no pas la quantitat que es troba a l'atmosfera (760 Pg) o en forma de biomassa (560 Pg).

2. Materials i mètodes

2.1. Zona d'estudi

Les parcel·les es van instal·lar en una zona de talussos restaurats l'any 1992 en una pedrera de l'empresa Rubau S.A. situada a la part nord de Girona (Ctra. de Palamós, s/n). Es tracta d'una pedrera de calcàries eocèniques d'on s'extreuen materials per a la construcció. Aquesta pedrera es va seleccionar per tenir un material geològic calcari que proporciona un substrat òptim per l'aplicació de fangs i, per la proximitat a l'estació depuradora d'aigües residuals de Girona (DARGISA) que va subministrar els fangs.

2.2. Disseny experimental

Aquest treball es basa en una de les primeres experiències d'utilització de fangs de depuradora en la restauració de pedreres de calcària que es va realitzar a Catalunya, l'any 1992. L'objectiu d'aquesta primera experiència va consistir fonamentalment en l'assaig de dues dosis i dues formes d'aplicació diferents (figura 2.1), tot i que en aquest treball només s'han estudiat les parcel·les amb barreja de sòl i fangs (B), ja que ha acabat sent la forma d'aplicació habitual dels fangs en aquest context. Hem caracteritzat les mostres inicials (1992), i estudiat amb detall la MOS de les mostres de l'any 2009, després de 17 anys de transformació al camp.

		Forma d'aplicació	
		Aplicació directa	Barreja prèvia
Dosi de fang	0 %	C	
	7,5 %	7A	7B
	15 %	15A	15B

Figura 2.1. Esquema dels tractaments provats en l'aplicació dels fang en la restauració. La dosi de fang de 7,5% s'anomena 7 i la del 15% s'anomena 15.
Font: Adaptat d'Ortiz, 1998.

2.3. Caracterització i anàlisi dels sòls restaurats

Els paràmetres químics i biològics que s'han considerat en aquest estudi per tal d'avaluar la capacitat de segrest de carboni i la qualitat de la MO del sòl restaurat amb fangs de depuradora es presenten a la taula 2.1 (veure els procediments dels mètodes analítics a l'annex 10.3 de la memòria del projecte). El carboni oxidable total i el carboni no hidrolitzable han estat analitzats, també en les mostres inicials que es van agafar l'any 1992 i que es conserven a l'edafoteca del laboratori de sòls del CREAF.

Els efectes de la dosi de fangs sobre el valor analític dels paràmetres considerats s'han avaluat mitjançant anàlisi de variància (ANOVA), prenent la dosi nominal de fangs com a font de variació (variable independent), utilitzant el programa *StatView*.

D'altra banda, per a l'estudi de la dinàmica de la MOS s'ha utilitzat un model diferencial d'una fase utilitzant el programa *Statistica*. Aquest model assumeix que la MO de cada reservori segueix una cinètica de mineralització de primer ordre, tal com s'expresa a la següent expressió:

$$C_{orgtotal} = C_{org(0)} \cdot e^{-k \cdot t}$$

On $C_{org\ total}$: C a la MOS al llarg de la incubació.

$C_{org(0)}$: C a la MOS a l'inici de la incubació.

k: Taxa de mineralització de la MOS

t: temps

Aquest model diferencial ha permès l'estimació de la taxa de mineralització de la MOS (k) i el seu temps mitjà de residència al sòl (TMR = 1/k). La parametrització del model s'ha fet mitjançant la incubació de mostres de sòl (equivalents a 35 g de matèria seca) de les diferents parcel·les experimentals a 21°C i al 50% de capacitat de camp durant un període de 154 dies, durant el qual s'ha anat mesurant periòdicament la producció de CO₂ de les mostres, els dies 3, 12, 21, 42, 70, 117 i 154 posteriors al muntatge de la incubació. Durant aquest període s'han incubat un total de 3 mostres de cada parcel·la experimental.

Taula 2.1. Paràmetres químics i biològics en que s'ha fonamentat l'estudi de la capacitat de segrest de carboni i la qualitat de MO del sòl restaurat amb fangs de depuradora amb les seves unitats i els mètodes analítics utilitzats

Paràmetre	Unitats	Mètode
Carboni orgànic oxidable total($C_{org\ total}$)	g.kg sòl ⁻¹	Oxidació via humida
Carboni no hidrolitzable (CNH)	g.kg sòl ⁻¹	Hidròlisi àcida + Oxidació via humida
Carboni extractable amb sulfat de potassi (C-K ₂ SO ₄)	mg.kg sòl ⁻¹	Extracció + Oxidació via humida
Carboni extractable amb cloroform (C-CHCl ₃)	mg.kg sòl ⁻¹	Fumigació-Extracció + Oxidació via humida de Vance <i>et al.</i>
Activitat respiratòria (ARP)	mg C-CO ₂ . kg sòl ⁻¹ .dia ⁻¹	Incubació i captació del CO ₂ amb NaOH
Coficient de mineralització del carboni (CMC)	mg C-CO ₂ . g-C ⁻¹ .dia ⁻¹	Càlcul
Quocient metabòlic microbià (qCO ₂)	any ⁻¹	Càlcul
Taxa de mineralització de la MOS (k)	any ⁻¹	Paràmetres del model de mineralització
Temps mitjà de residència (TMR)	dia	Paràmetres del model de mineralització

3. Resultats

3.1. Carboni orgànic oxidable total ($C_{org\ total}$)

L'ANOVA demostra ($F=78.99$ i $p<0.0001$, taula 3.1) que l'addició de fangs va incrementar sensiblement el contingut de C orgànic a les diferents parcel·les l'any 1992, fins a 12.22 g kg^{-1} a les parcel·les 7B, i 14.89 g kg^{-1} a les 15B, respecte als 7.00 g kg^{-1} presents a les parcel·les control. L'anàlisi de les mostres de l'any 2009 segueixen indicant un efecte clar de la dosi de fangs sobre el contingut de C orgànic ($F=20.69$ i $p<0.0001$, taula 3.2), per bé que sembla que hi ha una lleugera tendència a reduir els nivells de MO a les parcel·les que contenen fangs, aproximadament un 12% a la parcel·la 7B i 5% a la 15B, mentre que la parcel·la control ha experimentat un augment del 5%, però s'ha de tenir en compte que la variabilitat de les dades finals és més gran que la variabilitat de les inicials (figura 3.1).

Taula 3.1. Resultats dels paràmetres químics i biològics analitzats a les mostres de l'any 1992 en funció de la dosi de fangs aplicades amb els seus respectius errors expressats com la seva desviació estàndard i els valors de significança estadística obtinguts mitjançant un anàlisi de variància

Paràmetre	C	7B	15B	F	P
$C_{org\ total}$ (g kg^{-1})	$7.00_a \pm 1.86$	$12.22_b \pm 1.06$	$14.89_c \pm 1.64$	78,99	<0,0001
CNH (g kg^{-1})	$4.01_a \pm 1.85$	$4.50_{ab} \pm 0.94$	$5.55_b \pm 0.85$	4,44	0,0196
CNH (gC gC^{-1})	$0.64_a \pm 0.42$	$0.36_b \pm 0.06$	$0.37_b \pm 0.03$	5,01	0,0126

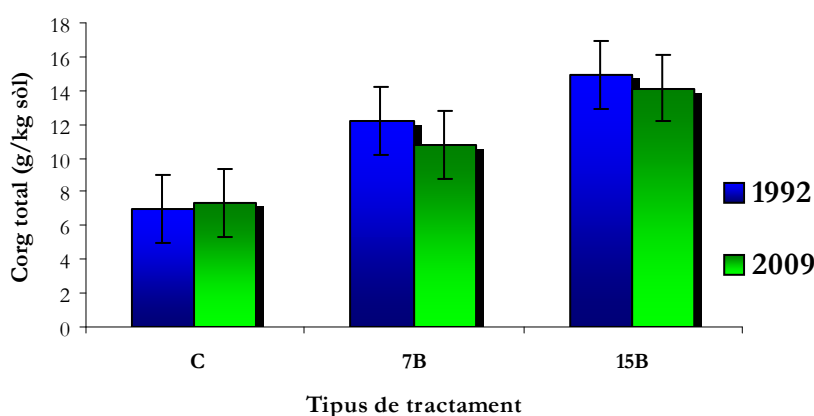


Figura 3.1. Carboni orgànic oxidable total quantificat pels diferents tipus de tractament en els dos períodes de temps, 1992 i 2009.

3.2. Carboni no hidrolitzable (CNH)

L'ANOVA demostra ($F=4.44$ i $p<0.0196$, taula 3.1) que els resultats obtinguts pel CNH a les mostres de l'any 1992, només augmenta lleugerament en funció de la dosi de fangs aplicades. No obstant, en proporció (gC gC^{-1}) es pot observar que el contingut de MOS estable és significativament més alt a la parcel·la control (aproximadament el doble) en comparació a les parcel·les amb fangs ($P=0.0126$). En aquestes últimes es pot veure que inicialment el contingut de MOS estable és independent de la dosi de fangs aplicada, i que el resultat depèn del fet d'haver incorporat o no fangs de depuradora al sòl.

D'altra banda, l'anàlisi de variància ($F=42,92$ i $p<0,0001$, taula 3.2) de les mostres de l'any 2009, mostra que el contingut de MO resistent a la mineralització s'ha incrementat a les parcel·les amb fangs, i que aquest augment de l'estabilitat de la MOS es relaciona significativament amb la dosi de fangs aplicada, així a una dosi més alta de fang el contingut de MOS estable és major (figura 3.2). La proporció de C orgànic resistent ($gC\ gC^{-1}$) l'any 2009 s'ha duplicat a les parcel·les tractades amb fangs respecte als nivells de l'any 1992, i això ha portat a què no hi hagi diferències significatives entre les parcel·les amb fangs i les control.

Taula 3.2. Resultats dels paràmetres químics i biològics analitzats a les mostres de l'any 2009 en funció de la dosi de fangs aplicades amb els seus respectives errors expressats com la seva desviació estàndard i els valors de significança estadística obtinguts mitjançant un anàlisi de variància

Paràmetre	C	7B	15B	F	p
C _{org total} (g kg sòl ⁻¹)	7,33 _a ± 1,12	10,77 _b ± 2,31	14,14 _c ± 5,80	20,69	<0,0001
CNH (g kg sòl ⁻¹)	4,24 _a ± 1,74	6,68 _b ± 1,12	8,22 _c ± 1,56	42,92	<0,0001
CNH (gC gC ⁻¹)	0,57 _a ± 0,21	0,63 _a ± 0,12	0,66 _a ± 0,27	1,24	0,2943
C-K ₂ SO ₄ (mg kg sòl ⁻¹)	51,75 _a ± 10,70	77,70 _b ± 12,68	93,83 _c ± 24,94	36,13	<0,0001
C-K ₂ SO ₄ (mg g C ⁻¹)	7,19 _a ± 1,85	7,50 _a ± 1,96	7,87 _a ± 4,39	0,31	0,7317
C-CHCl ₃ (mg kg sòl ⁻¹)	149,99 _a ± 52,63	160,78 _a ± 34,56	157,20 _a ± 34,26	0,42	0,6570
C-CHCl ₃ (mg g C ⁻¹)	20,58 _a ± 7,47	15,30 _b ± 3,43	12,37 _b ± 4,13	14,67	<0,0001
ARP (mg C-CO ₂ kg sòl ⁻¹ dia ⁻¹)	5,23 _a ± 1,44	5,72 _a ± 1,18	5,68 _a ± 1,66	0,42	0,6584
CMC (mg C-CO ₂ g-C ⁻¹ dia ⁻¹)	0,72 _a ± 0,18	0,55 _b ± 0,12	0,45 _b ± 0,19	7,49	0,0021
qCO ₂ (any ⁻¹)	14,38 _a ± 4,23	13,76 _a ± 4,01	13,77 _a ± 3,70	0,09	0,9094
k (any ⁻¹)	0,31 _a ± 0,08	0,23 _b ± 0,04	0,19 _b ± 0,08	7,94	0,0015
MRT (dia)	1236 _a ± 272	1657 _b ± 365	2175 _c ± 754	10,24	0,0003

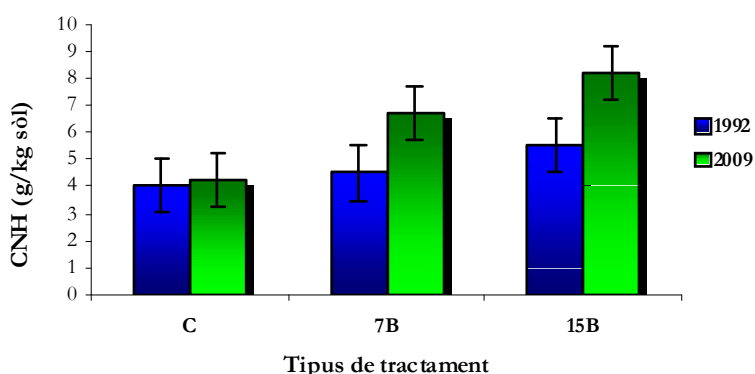


Figura 3.2. Carboni no hidrolitzable quantificat pels diferents tipus de tractament en els dos períodes de temps, 1992 i 2009.

3.3. Carboni extractable amb sulfat de potassi (C-K₂SO₄)

L'ANOVA demostra ($F=36,13$ i $p<0,0001$, taula 3.2) que el contingut de MO làbil augmenta en funció de la dosi de fangs aplicada i que aquesta relació és significativa. Tot i això, quan s'observa el contingut de MO làbil en proporció al contingut del carboni present al sòl, troben que no hi ha diferències significatives entre les parcel·les control i les parcel·les amb fangs ($F=0,31$ i $p=0,7317$,

taula 3.2). Dit d'una altra manera, la proporció de C extractable amb K_2SO_4 és la mateixa en tots els tipus de parcel·les.

3.4. Carboni extractable amb cloroform (C-CHCl₃)

L'ANOVA demostra ($F=0,42$ i $p=0,6570$, taula 3.2) que els resultats que s'han obtingut en la mesura indirecta de la biomassa microbiana en termes absoluts ($mg\ kg\ sòl^{-1}$) no presenten una diferència significativa en funció de la dosi de fangs aplicada. Ara bé, l'anàlisi de variància mostra també ($F=14,67$ i $p<0,0001$, taula 3.2) que la proporció de C-CHCl₃ ($mg\ g\ C^{-1}$), si que depèn de la dosi de fangs utilitzada per a la restauració, i és menor a les parcel·les tractades amb fangs.

3.5. Activitat Respiratòria Potencial (ARP)

L'ANOVA demostra ($F=0,42$ i $p=0,6584$, taula 3.2) que els resultats que s'han obtingut en les determinacions de l'ARP no presenten diferències significatives en funció del tipus de tractament, i es pot dir, que l'activitat respiratòria és la mateixa en totes les parcel·les.

3.6. Coeficient de Mineralització del Carboni (CMC)

L'ANOVA demostra ($F=7,49$ i $p=0,0021$, taula 3.2) que la proporció a la quantitat de carboni orgànic que es mineralitza és significativament menor a les parcel·les amb fangs. Aquest resultat coincideix amb els valors dels paràmetres obtinguts del model, k i TMR.

3.7. Quocient metabòlic microbià (qCO_2)

L'ANOVA demostra ($F=0,09$ i $p=0,9094$, taula 3.2) que l'activitat mineralitzadora de la biomassa microbiana és la mateixa per als tres tipus de parcel·les. És a dir, que l'addició dels fangs no repercuteix en l'activitat metabòlica heterotròfica de la biomassa microbiana del sòl.

3.8. Paràmetres del model (k i TMR)

De manera anàloga al que s'ha obtingut per al CMC, l'ANOVA demostra ($F=7,94$ i $p=0,0015$, taula 3.2) que la taxa de mineralització de la matèria orgànica (k) varia significativament pel fet d'haver incorporat fangs, però que els canvis no són significatius entre les dues dosis de fangs. Quan al TMR, l'anàlisi de variància sí que mostra en aquest cas ($F=10,24$ i $p=0,0003$, taula 3.2) que augmenta significativament en funció de la dosi de fangs. Cal destacar que el TMR de la matèria orgànica és gairebé 2,5 anys superior al del control, a les parcel·les tractades amb la dosi alta de fangs.

4. Discussió

Dos fets fonamentals per a l'estudi de la capacitat de segrest de carboni i la qualitat de la MO dels sòls restaurats amb fangs de depuradora han estat demostrats en aquest treball: *la conservació del contingut total de MOS i l'augment de la seva estabilitat final a nivells més alts que els de la MOS de les parcel·les de control*, que es tradueix en un major temps de residència al sòl. És justament la combinació d'aquests dos fets a les parcel·les tractades amb fangs de depuradora la que considerem molt rellevant en el context del segrest de C al sòl. L'increment en l'estabilitat de la matèria orgànica era del tot esperable, si tenim en compte que els fangs de depuradora porten una gran proporció de matèria orgànica làbil i que, en conseqüència, es pot mineralitzar fàcilment un cop incorporada al sòl. Aquesta mineralització ràpida, doncs, és la responsable que romanguin al

sòl els compostos més recalcitrants i per tant que incrementi el grau d'estabilitat de la matèria orgànica. D'altra banda, la conservació dels nivells de MOS implica que se n'ha produït un recanvi, és a dir, que les pèrdues per mineralització han estat compensades per la incorporació de nous components orgànics a partir de la biota que ha colonitzat les superfícies restaurades.

La hipòtesi del recanvi de MOS per mineralització de les fraccions làbils dels fangs i incorporació de restes orgàniques, fonamentalment vegetals, pot explicar el manteniment dels nivells de MOS. Però no el fet que el temps mitjà de residència de la MOS incrementi a les parcel·les tractades amb fangs més enllà dels valors que mostra la matèria orgànica de les parcel·les de control, ja que (i) la matèria orgànica que es va incorporar amb els fangs presentava un grau de protecció bioquímica molt baix, i (ii) la qualitat de la matèria orgànica que s'ha anat incorporant al sòl durant aquests anys ha estat presumiblement equivalent a totes les parcel·les. En aquest sentit, el seguiment que es va efectuar a les parcel·les experimentals en relació al desenvolupament de la vegetació (espècies i recobriment) durant el primer any i l'observació de l'estat actual de la vegetació de les parcel·les (dades no mostrades) no suggereixen diferències en la qualitat de la matèria orgànica que s'incorpora anualment al sòl. Això fa pensar que, de manera addicional a aquest recanvi de la MOS, possiblement una part de la MO dels fangs encara es conservi al sòl de les parcel·les on va ser incorporada, tant la fracció que a l'inici ja estava protegida bioquímicament com una porció més o menys rellevant de la MO làbil, que pot haver quedat protegida de la mineralització per exclusió biòtica (protecció química i física) o que, com a conseqüència de l'activitat microbiana, s'hagi humificat tornant-se més estable, procés que posa en evidència Lützow *et al.* (2006) quan fa referència a la recalcitrància dels polimers humificats i que no és més que la protecció bioquímica de Six *et al.* (2002).

En aquest treball hem assajat dues aproximacions per a avaluar l'estabilitat de la MOS. D'una banda, els resultats obtinguts pel CNH a l'any 2009 demostren que l'estabilitat bioquímica de la MOS dels sòls restaurats s'ha incrementat i és similar per a les diferents parcel·les, tot i que per a la parcel·la 15B és lleugerament major. D'altra banda, les mesures de l'activitat heterotròfica ens han demostrat que la mineralització de la matèria orgànica és menor a les parcel·les tractades amb fangs i, dins d'aquestes, menor com més gran hagi estat la dosi de fangs aportada. Aquests resultats només són contradictoris en aparença, ja que les mesures del CNH ens aporten informació sobre el C protegit per mecanismes bioquímics, mentre que les mesures respiromètriques ens informen de la quantitat de MOS que es mineralitza i per tant de la fracció de MOS que, gràcies a mecanismes no únicament bioquímics, està protegida. La discrepància aparent, doncs, entre els resultats obtinguts en la quantificació del CNH i en el C mineralitzat ens indica que existeixen mecanismes addicionals de protecció de la MOS que se sumen a la protecció bioquímica, i que aquests mecanismes són més efectius com més alta hagi estat la dosi de fangs aportada al sòl.

D'altra banda, malgrat que la proporció de MO làbil (estimada en aquest treball com a Mo extractable amb K_2SO_4) presenta uns valors similars per a cada tipus de tractament, les proporcions de biomassa microbiana (estimada com a carboni extractable amb cloroform), el coeficient de mineralització del carboni (CMC) i la taxa de mineralització (k) són clarament majors a les parcel·les control, fet que posa en evidència que la MOS làbil és menys activa en els sòls restaurats en fangs, fet que reforça la hipòtesi de l'existència de mecanismes addicionals de protecció de la MOS en aquestes parcel·les.

La mesura del quocient metabòlic microbià (qCO_2), que és una estimació del consum energètic de la biomassa microbiana del sòl, descarta la possibilitat que l'addició dels fangs hagi ocasionat cap tipus d'estrès microbià, ja que si es compara el valor d'aquest paràmetre per a les parcel·les control i les que tenen fangs es troba que són similars i que no hi ha cap diferència significativa en funció de la dosi de fangs aplicada. Hi ha menys activitat heterotròfica a les parcel·les tractades amb fangs simplement perquè hi ha menys proporció de biomassa microbiana, no perquè la biomassa mostri un nivell d'activitat diferent. I aquest fet també és compatible amb l'existència de mecanismes addicionals de protecció de la MOS.

Pot resultar interessant, doncs, preguntar-nos sobre quins són aquests mecanismes que contribueixen a protegir la MOS, de manera particular a les parcel·les tractades amb fangs de depuradora. Segons la classificació de Six *et al.* (2002), els mecanismes addicionals a la protecció bioquímica que poden estar actuant en els sòls restaurats amb fangs de depuradora són els de protecció química i de protecció física.

La relació entre l'estabilitat de la MOS i el contingut de partícules de argila i llim, ha estat clarament demostrat per Sørensen (1972), Merckx *et al.* (1985), Feller i Beare (1997) i Hassink (1997). Aquesta protecció química, que com ja s'ha dit és el resultat de la interacció entre la MOS i els minerals del sòl, pot haver estat important al sòl de les parcel·les experimentals gràcies al contingut rellevant d'argiles i llims, poc més del 45%, del sòl receptor (veure taula 4.1). Els fangs de depuradora també contenen una notable proporció de llims i argiles, tot i que la dosi en què es van incorporar al sòl no implica canvis granulomètrics rellevants. Per tant, podem pensar que tot i que pot haver estat un mecanisme de protecció destacat, la seva capacitat de protecció no haurà variat pel fet d'incorporar o no els fangs.

Pel que fa a la protecció física, que es dona gràcies a la incorporació de la MOS en els microagregats, aquest mecanisme es pot haver vist afavorit pel paper positiu que té la MOS en l'agregació i estructuració del sòl. Sort i Alcañiz (1998) van trobar que l'aplicació de fangs als sòls fa augmentar significativament la macroporositat i microporositat, a conseqüència d'aquests processos d'estructuració del sòl.

La inclusió de MO en els agregats pot explicar que una part de la MO làbil dels sòls restaurats sigui menys activa. Golchin *et al.* 1994 van reportar diferències significatives en l'estructura química de la MOS làbil que es trobava físicament disponible i la que estava protegida dintre dels microagregats. Els seus resultats suggereixen que la protecció física en microagregats deixa només a l'atac dels microorganismes els components més senzills, i que les molècules més complexes, tot i que làbils quan es troben en forma particulada o soluble, romanen efectivament protegides. També Annabi *et al.* (2007) van observar que quan s'afegeixen fangs de depuradora al sòl com a adob orgànic, s'incrementa l'estabilitat de la MOS com a conseqüència de la forta cohesió que es dona entre els components húmics i els agregats. El grau d'estructuració depenent de la dosi de fangs, segons que van reportar Sort i Alcañiz (1998) a les mateixes parcel·les que hem estudiat, pot ser doncs una de les raons que expliqui la major protecció de la MOS a les parcel·les tractades amb fangs.

La influència de les propietats físiques sobre el segrest de carboni en els sòls, també ha estat senyalada per Lamparter *et al.* (2009) els quals van trobar que hi havia una relació entre l'estructura del sòl i el seu contingut d'humitat amb el segrest de carboni. Aquesta relació ve donada principalment per la inaccessibilitat a l'aigua continguda dintre dels microagregats, que interfereix per tant en la disponibilitat hídrica necessària per a la mineralització, però també han trobat que l'aigua dels microagregats augmenta la seva tensió superficial, la qual cosa fa que disminueixi la interacció entre l'aigua i les substàncies orgàniques adsorbides i els seus grups funcionals. Però, aquesta baixa interacció entre la MOS amb l'aigua també ve afavorida per la hidrofobicitat de la MOS, la qual augmenta significativament amb l'addició de adobs orgànics com els fangs de depuradora (Oliveira *et al.*, 2009). Goebel *et al.* (2005) van trobar que quan més hidrofobicitat presentava la MOS la taxa de mineralització disminuïa significativament, degut a què quedava encapsulada dins dels agregats i disminuïa l'accessibilitat de la biomassa microbiana del sòl a l'aigua, als nutrients i a l'oxigen. El caràcter hidrofòbic de la MOS, incrementat per l'addició dels fangs, ens permet sustentar la teoria que una fracció de la MO dels fangs pot quedar en la matriu del sòl i que la seva hidrofobicitat ajuda a fer-la més resistent a la mineralització (Mataix-Solera i Doerr, 2004). Aquest mecanisme constitueix, doncs, un sistema de protecció addicional a la protecció física.

Recentment s'ha publicat un estudi (Cruz, 2010) sobre la incorporació de MO i els processos d'estructuració en runams de mines de carbó restaurats amb residus orgànics que ajuda a recolzar la teoria de la persistència en el temps de la MO dels fangs de depuradora en els sòls restaurats i com a possible responsable de l'augment de la seva estabilitat i millora de la capacitat de segrest de carboni. En aquest treball es van utilitzar tècniques micromorfològiques i micromorfomètriques per estudiar mostres de sòl inalterades, amb l'objectiu d'identificar els components de la MOS i la seva distribució dins de la matriu del sòl. Les imatges obtingudes mostren clarament la presència de restes de fangs de depuradora després de 13 anys de la seva incorporació al sòl. Aquestes restes es poden trobar formant grànuls que es distribueixen entre els components minerals, o bé incloses en els agregats del sòl, observació que sembla que corrobora la nostra hipòtesi de la protecció per hidrofobicitat sumada a la protecció física (figura 4.1).

Els resultats que s'han obtingut en aquest treball permeten afirmar, doncs, que la matèria orgànica que s'incorpora al sòl mitjançant l'aportació de fangs de depuradores no només s'hi conserva, sinó que a més experimenta processos molt remarcables d'estabilització, fet que n'assegura la conservació a llarg termini. En el context de l'ecologia de la restauració, aquest resultat és important, ja que significa que la millora de la qualitat del sòl que s'ha assolit gràcies a l'esmena

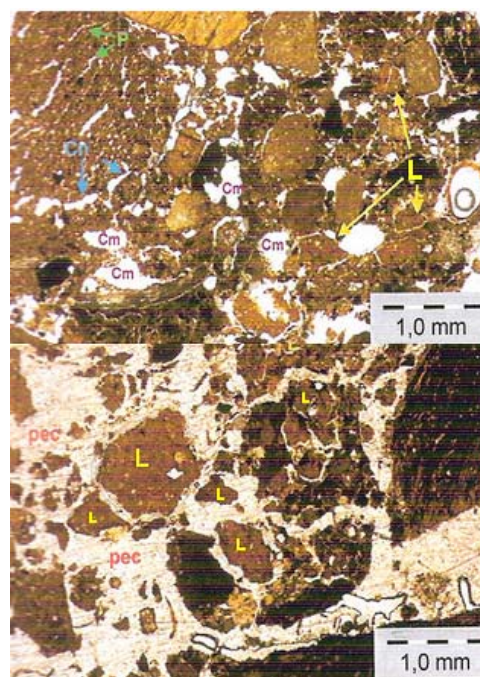


Figura 4.1. Imatges que mostren les característiques descriptives i les diferents formes de MOS, on es pot observar les restes de fangs que es senyalitzen amb la lletra L. Font: Cruz, 2010.

orgànica es podrà mantenir a llarg termini. Aquests resultats també tenen implicacions en relació al canvi climàtic i a la capacitat del sòl per segrestar C, ja que demostren que aquest tipus d'addicions orgàniques contribueixen de manera efectiva a incrementar l'estoc de C al sòl, i que a més l'emmagatzematge es produeix en formes orgàniques estables.

Caldria, no obstant, investigar més a fons en quina mesura contribueixen els diferents mecanismes d'estabilització de la MOS que aquí hem proposat com a compatibles amb els nostres resultats, i quines pràctiques de maneig del sòl poden incrementar-ne la capacitat de segrest de C.

5. Conclusions

Els continguts totals de matèria orgànica s'han mantingut pràcticament invariables durant els 17 anys posteriors a la incorporació de fangs de depuradora al sòl.

La proporció de matèria orgànica estabilitzada per protecció bioquímica a les parcel·les tractades amb fangs de depuradora s'ha pràcticament duplicat durant el període de temps considerat. Per contra, s'ha mantingut estable a les parcel·les control.

La taxa de mineralització de la matèria orgànica és menor com més alta hagi estat la dosi de fangs incorporada al sòl. En conseqüència, el seu temps mitjà de residència és major a les parcel·les tractades amb les dosis majors de fangs.

La major activitat heterotròfica del sòl de control es pot explicar per la presència d'una major proporció de biomassa microbiana, i no hi ha cap indicatiu que faci pensar en estrès de la comunitat microbiana de les parcel·les tractades amb fangs.

El segrest de C que s'ha donat a les parcel·les tractades amb fangs de depuradora es deu a (i) la conservació i augment de la MO recalcitrant, i (ii) la protecció d'una porció més o menys rellevant de la MO làbil continguda amb els fangs de depuradora. Els resultats que s'han obtingut són compatibles amb l'existència de mecanismes de protecció química que afectarien tots els sòls per igual i mecanismes de protecció física i per hidrofobicitat, que afectarien en major mesura els sòls tractats amb fangs de depuradora.

Els mecanismes d'estabilització bioquímica (humificació), química i física de la MOS s'han vist potenciats per l'addició de la MO dels fangs.

La utilització de fangs de depuradora en la restauració de sòls calcaris denudats sembla una opció possible i econòmicament viable en el cas de la restauració de pedreres, i representa una pràctica de conservació i gestió del territori molt interessant i prometedora en relació a les polítiques de mitigació del canvi climàtic.

6. Referències

A la memòria del projecte