
3.4 DISCUSSIÓ

Donat que s'ha aplicat la mateixa dosi nominal de fang en totes les parcel·les tractades, el contingut de carboni orgànic és molt similar, de manera que no ha estat contemplat en aquesta discussió. No obstant, hem cregut important justificar les lleugeres diferències observades entre les dues zones experimentals (tipus de sòls). Aquestes com s'ha pogut veure en l'apartat de resultats no depenen del tipus de tractament tal com demostra l'anàlisi de la variància. D'acord amb Röver i Kaiser (1999), sovint es confon la heterogeneïtat de tipus espacial per una variació de tipus temporal. En aquest cas, podem pensar que es tracta tant d'una heterogeneïtat de tipus espacial com temporal, ja que en els sòls no esmenats (control), on no hi ha hagut cap aportació de matèria orgànica, s'hi observa també una gran variabilitat. L'increment de carboni que s'observa immediatament després de l'aplicació és major en els sòls esmenats de textura arenosa (la Vallmitjana) que als sòls de textura franca (el Puig). Això, es pot explicar per l'aportació de matèria orgànica extra provinent de les restes vegetals triturades dipositades abans de l'aplicació dels fangs. Aquestes diferències, però, només es detecten al moment inicial, és a dir, desapareixen a curt termini degut a la integració de la matèria orgànica aportada amb els fangs, molt superior en relació a la de les restes vegetals. Si observem els valors de carboni orgànic dels sòls de l'experiment del 2000 (veure capítol 1) tot i haver-hi aplicat una dosi de fang similar ($12 \text{ Mg m.s ha}^{-1}$) eren lleugerament superiors ($3,7 \pm 0,8$). Les diferències amb els valors obtinguts en aquest experiment poden ser lleugerament menors del que es podria esperar, donat l'efecte de dilució al haver mostrejat de 0 a 20 cm.

Així doncs, centrarem aquesta discussió en les propietats biològiques del sòl. Per facilitar la interpretació dels resultats obtinguts, s'ha sintetitzat la informació seguint el model emprat en la discussió dels resultats de l'experiment de laboratori (capítol 2). En aquest cas es sumaritzen els principals efectes observats a curt i mitjà termini (taula 3.13).

Taula 3.13. Resum dels principals efectes observats sobre els paràmetres biològics del sòl.

A curt termini (t=0 a t=8 setmanes) i mitjà termini (t=1a a t=60 setmana). Tipus de fang (C, F, T) i tipus de sòl (franc i arenós. Els símbols >, < i = indiquen l'ordenació dels diferents tractaments sempre que s'hagin detectat diferències estadísticament significatives ($\alpha \leq 0,05$).

PARÀMETRE	FACTOR	Efectes a	
		curt termini	mitjà termini
Activitat respiratòria potencial	Sòl	Franc>arenós	Franc=arenós
	Fang	T>(F=C)	T=F=C
Coeficient de mineralització del carboni	Sòl	Franc>arenós	Franc<arenós
	Fang	T>(F=C)	T=F=C
Biomassa microbiana de carboni	Sòl	Franc>arenós	Franc>arenós
	Fang	T=F=C	T=F=C
Relació C-mic/C-Org	Sòl	Franc>arenós	Franc>arenós
	Fang	T=F=C	T=F=C
Quocient metabòlic microbià	Sòl	Franc<arenós	Franc<arenós
	Fang	T>(F=C)	T=F=C
Flux de CO ₂ *	Sòl	Franc>arenós	Franc>arenós
	Fang	F>(T=C)	T=F=C

* s'ha mostrejat fins a 82 setmanes després de l'aplicació dels fangs amb una periodicitat diferent a la dels altres paràmetres.

3.4.1 EFECTES A CURT TERMINI

Igual com ja s'havia observat en l'experiment de laboratori (capítol 2), en els sòls esmenats amb fangs es produeix un increment de tots els paràmetres biològics. En aquest cas, però, hi ha una diferència significativa entre els dos sòls, cosa que no s'havia apreciat en les incubacions al laboratori. Els sòls de textura franca (el Puig) en general presenten nivells superiors dels paràmetres estudiats a causa de i) una major capacitat de retenció d'aigua (Ojeda, *et al* 2003) i, ii) una major aireació, degut als treballs de preparació del sòl (llaurat i fressada) que va tenir lloc abans de l'aplicació dels fangs. D'acord amb el primer argument (i), està ben demostrat que l'activitat microbiana està fortament influenciada pel contingut d'aigua (Parr *et al.*, 1981) i, per tant, esperarem que en el sòl franc estiguin afavorits els paràmetres estudiats. Zimmerman i Frey (2002), mostren com el dèficit d'aigua del sòl en restringeix la respiració. Pel que fa al segon argument (ii), malgrat que no és un efecte permanent, la llaurada incrementa el volum de macroporus i per tant l'aireació (Watts *et al.*, 2000). En conseqüència hi ha una estimulació temporal de l'activitat respiratòria que pot durar uns mesos. Per altra banda, des de fa temps se sap (Kaiser *et al.*, 1992) que la biomassa microbiana i llur activitat es correlacionen positivament amb textures fines com les del sòl de margues.

L'aplicació de substàncies orgàniques làbils provoca un increment de l'activitat dels microorganismes del sòl i una acceleració de la mineralització de la matèria orgànica (Kuzyakov *et al.*, 2000; De Nobili *et al.*, 2001). Nombrosos autors han demostrat que la

incorporació de matèria orgànica fresca al sòl intensifica la mineralització de la matèria orgànica (Pascual *et al.*, 1999; Fontaine *et al.*, 1999). L'estimulació de la mineralització, es coneix com a "*priming effect*", i és el resultat de l'activació de l'activitat microbiana degut a l'alta disponibilitat d'energia i nutrients provinents de la MOF. D'acord amb Kuzyakov *et al.* (2000), aquests efectes els podem denominar efectes estimuladors positius.

L'activitat respiratòria potencial incrementa en tots els sòls que han rebut un aportació orgànica (fangs) però d'una manera més intensa en les parcel·les adobades amb fang tèrmic. Aquests resultats coincideixen amb els resultats de les proves fetes en incubacions de laboratori (capítol 2). La caracterització analítica dels fangs emprats en aquest experiment (Informe Ecofangs, 2003), corresponent a les partides de l'any 2001 i 2002 demostra que els fangs tèrmics presenten un menor grau d'estabilitat que els fangs frescos i compostats, i un lleuger increment en el contingut de carboni oxidable en relació al fang fresc i gairebé el doble en relació al fang compostat. També la quantitat de carbohidrats extractables (CHT) al sòl, (Ecofangs, 2003) és més elevada i poden ser els responsables d'aquest increment, ja que aquests components constitueixen la principal font de carboni làbil i energia dels microorganismes edàfics (Smith, 1979). Segons l'informe abans citat, els fangs tèrmics que es van emprar per l'experiment de laboratori (capítol 2; partida de fangs del 2000) tenien una concentració inicial de carbohidrats ($CHT_{inicial}$) major a la dels altres fangs. Tot i no disposar de les dades sobre els carbohidrats dels fangs emprats en aquest experiment (partida de fangs del 2001) podem esperar que també en aquest cas sigui major. Això justificaria que en els sòls esmenats amb fang assecat tèrmicament, immediatament després de l'aplicació, hi hagi una major activitat respiratòria. No és descartable que el procés d'assecatge dels fangs provoqui una hidròlisi parcial de la matèria orgànica, originant compostos de menor pes molecular i més fàcilment mineralitzables.

El coeficient de mineralització del carboni, que relaciona el CO_2 producte de la respiració amb el contingut de carboni orgànic, ens pot donar una idea de la naturalesa de la matèria orgànica. El fet que els sòls que han rebut fang tèrmic presentin un coeficient de mineralització del carboni molt superior a la resta, ens està indicant que la matèria orgànica que aporten aquests fangs és més fàcilment oxidable, i per tant, d'una naturalesa més làbil. La major activitat respiratòria en els fangs assecats tèrmicament i un coeficient de mineralització del carboni també més elevat està indicant que els microorganismes del sòl intensifiquen la descomposició d'aquesta matèria orgànica menys estabilitzada.

La biomassa microbiana presenta també una resposta positiva a l'increment de matèria orgànica, com ja havíem observat en l'experiment de laboratori. Això s'observa clarament

al comparar les parcel·les adobades i els controls. Aquesta resposta, però, depèn també del tipus de sòl, ja que el màxim de biomassa microbiana en les parcel·les de la Vallmitjana es produeix més tard que al Puig. El que diferencia els dos sòls, a més de la textura, és també el seu ús. Així doncs, hem de diferenciar, el sòl de la Vallmitjana, amb un ús forestal, del sòl del Puig que va ser llaurat abans de l'aplicació dels fangs. Segons Rice *et al.*, (1996) el carboni microbià es veu influït per les condicions d'humitat i temperatura del sòl precedents, la qual cosa vol dir, que els sòls de textura franca que presenten condicions més favorables (major capacitat de retenció d'aigua) mantenen a l'inici un major creixement microbià. És interessant observar que la concentració de carboni microbià no varia segons els tipus de fangs, resultat ja observat en l'experiment de laboratori.

D'acord amb Anderson i Domsh (1989), Sparling (1992) el quocient C-mic/C-Org incrementa amb el temps com a conseqüència d'un major *input* de matèria orgànica fresca alliberada al sòl, en aquest cas la MOF aportada amb els fangs. Segons els mateixos autors, aquest quocient presenta un rang que va de 0,2 al 7%. Aquest marge es deu a les diferents condicions del sòl, com és la cobertura vegetal, l'ús del sòl, entre altres. Aquest quocient pot servir per indicar si el carboni del sòl està en equilibri. La tendència creixent que s'ha observat en les primeres vuit setmanes, sobretot en els sòls arenosos, és la conseqüència del retard que es produeix en el desenvolupament de la biomassa microbiana. Entre tractaments com és d'esperar no s'observen diferències a curt termini. Un factor addicional important que afecta aquest paràmetre és que el carboni microbià pot experimentar marcats canvis estacionals (Wardle, 1998), de manera que la forta davallada que es produeix a partir de la vuitena setmana es deu principalment l'inici de l'estació seca.

El quocient metabòlic (qCO_2), que relaciona l'activitat respiratòria potencial amb el carboni microbià present ($C-CO_2/C-mic$), és un bon indicador de l'activitat heterotròfica dels microorganismes del sòl (Anderson i Domsh, 1993). L'addició d'un substrat, en aquest cas matèria orgànica fresca, provoca un increment en el qCO_2 (Ocio i Brookes, 1990). Selivanovskaya *et al.*, (2001) demostren que els sòls tractats amb fangs tenen major quantitat de components orgànics biodegradables i, per tant, a l'inici de l'experiment, el qCO_2 és major que en els sòls no tractats. Wardle i Ghani (1995), proposen que en sistemes no-estressats (= no limitació de nutrients), la pertorbació que produeix l'aplicació del fertilitzant redueix l'eficiència microbiana i incrementa el quocient metabòlic (qCO_2). És a dir, proporcionalment hi ha més activitat respiratòria que creixement microbià. D'acord amb Caravaca i Roldán (2003), un quocient metabòlic alt indica una baixa eficiència en

l'ús del substrat i un possible efecte tòxic produït per algun element, és a dir, s'incorpora menys substrat en la biomassa microbiana. En aquest cas, els nivells significativament superiors observats en els sòls esmenats amb fangs assecats tèrmicament ens poden estar mostrant que hi ha hagut l'alliberació d'algun agent tòxic provinent dels mateixos. El descens dràstic del qCO_2 es deu a la reducció de l'activitat microbiana causada probablement per l'esgotament del carboni orgànic làbil, coincidint amb els resultats de Nicholson i Wardle (1994) que indiquen que els substrats que es degraden ràpidament mostren una disminució del qCO_2 a mesura que desapareix el substrat. No obstant, els mateixos autors destaquen que alhora d'interpretar estudis de fertilització s'han de prendre precaucions, ja que és força difícil distingir entre els efectes directes del fertilitzant sobre la microflora, dels efectes indirectes que es produeixen sobre com resposta a l'alteració del creixement de les plantes i de l'estructura de la comunitat provocada pel fertilitzant. Les diferències observades entre els dos sòls, amb un quocient metabòlic sensiblement superior als sòls arenosos, poden atribuir-se a la relació d'aquest paràmetre amb les propietats del sòl. Molts estudis han demostrat els efectes negatius de pH elevats i alts continguts d'argila sobre el qCO_2 (Wardle & Ghani, 1995).

La mesura del flux de diòxid de carboni a partir de les concentracions d'aquest gas a l'atmosfera interna del sòl, pot ser un indicador de la mineralització aeròbia del carboni (Tate, 1987) i, per tant, es produirà un increment del flux de CO_2 , com a producte de la intensa activitat heterotròfica dels microorganismes provocada per l'addició dels fangs. És interessant observar que en els sòls de textura franca, el flux sempre és superior, entre 1 i $3,5 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ front a $0,25\text{-}1,5 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ al dels sòls arenosos. L'explicació la trobem en les propietats del sòl on, (i) una menor densitat i major porositat del sòl franc (veure taula 3.2) afavorirà la difusió d'aquest gas i, per tant no s'acumularà a l'atmosfera edàfica i, (ii) també degut al treball de llaurat del sòl, que provoca un gran increment del flux de CO_2 (Eriksen i Jensen, 2001). Per altra banda, s'ha de destacar l'elevada sensibilitat d'aquest paràmetre als canvis en la temperatura (Fang i Moncrieff, 2000) i d'humitat del sòl (Maestres i Cortina, 2003). Els canvis estacionals poden ser atribuïts en part, al volum del sòl que és biològicament actiu (Rayment *et al.*, 2000), que depèn en gran part de les condicions de temperatura i humitat del sòl. Això ho podem constatar al comparar l'idèntic patró temporal dels dos sòls i entre els diferents tractaments. S'ha de tenir en compte també que aquest paràmetre inclou el CO_2 alliberat per la respiració de les arrels i, per tant, l'increment que s'observa a partir del segon mostreig (8^a setmana) no es pot atribuir únicament a la respiració microbiana ja que coincideix amb el moment màxim de creixement de la vegetació (veure capítol 5).

3.4.2 EFECTES A MITJÀ TERMINI

A mitjà termini l'efecte del tipus de fang ha desaparegut gairebé del tot, i no es detecten diferències entre tractaments. Això ens fa veure la importància de centrar aquests estudis en els primers estadis després de l'aplicació, perquè, com hem pogut veure, en aquest tipus d'aplicacions és quan es produeixen els canvis més importants. Cal, però, no oblidar que en aquest experiment s'ha utilitzat una dosi moderada ($\sim 11 \text{ Mg sms ha}^{-1}$) de fang i que aquests s'han aplicat de manera superficial. En experiments amb dosis de fang més elevades, els efectes poden tenir una major permanència temporal. Brendecke *et al.*, (1993), amb dosis de 24 Mg ha^{-1} de fangs, han arribat a detectar els efectes de les aplicacions sobre alguns indicadors biològics fins a 4 anys després de la seva incorporació al sòl.

S'ha pogut observar que les diferències entre els dos sòls es continuen mantenint a mitjà termini. Aquestes són degudes, per tant, a les diferències intrínseques dels dos sòls. Emmerling *et al.*, (2001), en els seu treball, destaquen que la textura de l'horitzó superficial (expressada en relació al nivell d'argila) és l'únic factor que influeix de manera significativa en els paràmetres investigats (C-org, C-mic, activitat enzimàtica i C-mic /C-org). Aquests autors observen que, en tots els paràmetres, decreixen els valors en els sòls de textures arenoses en comparació als sòls de textures fines.

3.4. CONCLUSIONS

L'aportació en superfície de dosis moderades de fangs al sòl provoca una cadena de canvis (efectes), tots ells associats a la matèria orgànica. La intensitat d'aquests canvis depèn del tipus de sòl però també del tipus de fang aplicat, i en aquest cas s'ha de pensar en les transformacions que experimenten els fangs en el procés d'higienització-estabilització (compostatge o assecatge tèrmic).

L'activitat respiratòria augmenta per l'addició del residu orgànic i s'observen diferències en funció del tipus de fang aplicat, amb una major activitat heterotròfica en els sòls que han rebut fang tèrmic. Pel que fa a la biomassa microbiana, els dos sòls presenten patrons molt diferents, amb valors superiors en els sòls de textura fina. En canvi, la biomassa microbiana no es veu afectada pel del tipus de fang.

La matèria orgànica aportada pels fangs es mineralitza ràpidament, sobretot en aquells sòls que han rebut fangs que contenen una proporció important de compostos làbils, com el fang tèrmic.

L'aportació d'una matèria orgànica fàcilment mineralitzable, fa que els microorganismes redueixin l'eficiència microbiana i per tant a l'inici incrementi el quocient metabòlic (qCO_2), sobretot en els sòls que han rebut fang tèrmic. El descens dràstic del qCO_2 , en aquest cas, ens pot estar indicant algun tipus d'estrès, provocat per algun agent inhibidor que fa que els microorganismes siguin menys actius.

En els sòls adobats, especialment els de textures fines, es produeix un increment immediat del flux de CO_2 , com a producte de la intensa activitat heterotròfica dels microorganismes provocada per l'addició dels fangs.

La manca d'estudis similars sobre aplicacions superficials dels fangs fa difícil la comparació d'aquests resultats. No obstant, pel que fa a l'activitat biològica del sòl, els fangs en milloren les seves propietats. A més llarg termini, s'observa un anivellament en tots els tractaments, cosa que implica un efecte reduït i concentrat en els primers mesos després de l'aplicació. Es pot dir, per tant, que els fangs funcionen com a catalitzadors del restabliment de la funcionalitat del sòl sempre i quan vagi acompanyada d'unes condicions d'humitat i temperatura del sòl adequades, és a dir, és important el moment de l'any en que es fan aquest tipus d'aplicacions. Per últim, la disminució dràstica observada en

l'eficiència dels microorganismes del sòl, com reflexa el seu quocient metabòlic microbià, ens fa pensar en algun tipus d'inhibició provocada possiblement per algun compost contingut en els fangs. Seria, per tant, interessant continuar investigant la resposta d'aquests residus al sòl, en relació a paràmetres indicadors de l'activitat heterotròfica, que puguin servir-nos per assegurar la innoqüitat dels fangs i, per tant, estar segurs que no poden provocar efectes nocius en els organismes del sòl. Aquests efectes, per una banda es poden observar en la microbiota, en la mesofauna, però també en la vegetació. Donat l'ús que se'n vol fer d'aquests sòls, de tipus silvopastura, cal considerar les implicacions que podria suposar per la cadena tròfica, amb l'últim esglaió l'home com a consumidor, hem d'estar absolutament segurs de la salubritat d'aquests materials.

3.5 REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Anderson, T.H & Domsh, K.H. 1989. Ratios of microbial biomass carbon to total orgànic carbon in arable soils. *Soil Biol. Biochem.* 21 (4): 471-479
- Anderson, T.-H. i K. H. Domsch. 1990. Application of eco-physiological quotients (q_{CO_2} and q_D) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biol. Biochem.*, 22: 251-255.
- Andrés, P. (1999) Ecological risks of the use of sewage sludge as fertilizer in soil restoration: Effects on the soil microarthropod populations. *Land Degradation & Development* 10:67-77
- Bingemann, C.W.; Varner, J.E. & Martin, W.P. 1953. The effect of the addition of orgànic materials on the decomposition of an orgànic soil. *Soil Science Society of America Proceedings* 17:34-38. In Kuzyakov, Y; Friedel, J.K.& Stahr, K. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biol. and Bioch.* 32: 1485-1498.
- Bragato, G.; Leita, L.; Figliola, A.& de Nobili, M. 1998. Effects of sewage sludge pre-treatment on microbial biomass and bioavailability of heavy metals. *Sil & Tillage Research.* 46: 129-134.
- Brendecke, J. W.; R. D. Axelson & I. L. Pepper. 1993. Soil microbial activity as an indicator of soil fertility: long term effects of municipal sewage sludge on an arid soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 25 (6): 751-758
- Caravaca, F. & Roldán, A. 2003. Assessing changes in physical and biological properties in a soil contaminated by oil sludges under semiarid Mediterranean conditions. *Geoderma*. Article in press.
- Carter, M. R., 1986. Microbial biomass as an index for tillage-induced changes in soil biological properties. *Soil tillage Res.* 7: 29-40.
- Cerdà, A. 2001. Terres marginals, abandonó del camp i erosió. Universitat de València. Mètode. 36.
- Chaudri, A.M.; McGrath, S.P.; Knight, B.P.; Johnson, D.L.& Jones, K.C. 1996. Toxicity of orgànic compounds to the indigenous population of *Rhizobium leguminosarum* biovar *Trifolii* in soil. *Soil.Biol.Biochem.* 28 (10/11). P. 1483-1487.
- De Nobili, M.; M. Contin, C. Mondini & P. C. Brookes. 2001. Soil microbial biomass is triggered into activity by trace amounts of substrate. *Soil Biology and Biochemistry*, 33: 1163-1170.
- Dommergues, Y. 1960. La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. *L'Agronomie Tropicale*, XV(1): 54-60.
- Emmerling, C.; Udelhoven, T. & Schröder, D. 2001. Response of soil microbial biomass and activity to agricultural de-intensification over a 10 year period. *Soil. Biol.& Biochem.* 33: 2105-2114
- Eriksen, J. & Jensen, L.S. 2001. Soil respiration, nitrogen mineralization and uptake in barley following cultivation of grazed grasslands. *Bio. Fertil. Soils.* 33: 139-145
- Fontaine, S.; Mariotti, A. & Abbadie, L. 2003. The priming effect of orgànic matter: a question of microbial competition?. *Soil Biol.Biochem.* 35: 837-843
- Henry, Ch. L.; Cole, D.W. & Harrison, R.B. 1994. Use of municipal sludge to restore and improve site productivity in forestry: the Pack Forest Sludge Research Program. *Forest Ecology and Management*, 66: 137-149

- Insam, H. & Haselwandter, K. 1989. Metabolic quotient of the soil microflora in relation to plant succession. *Oecologia*. 79: 174-178.
- Joshua, W.D.; Michalk, D.L.; Curtis, I.H.; Salt, M. & Osborne, G.J. 1998. The potential for contamination of soil and surface waters from sewage sludge biosolids in a sheep grazing study, Australia. *Geoderma* 84 1998 135–156
- Ferrari, J. L.; Garcia, F. O. & Echeverria, H. E. 1997. Evolución del Carbono y Nitrógeno de la biomasa microbiana durante el desarrollo del cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo* 15: 64 – 70.
- Kaiser, E. -A.; T. Mueller, R. G. Joergensen, H. Insam & O. Heinemeyer. 1992. Evaluation of methods to estimate the soil microbial biomass and the relationship with soil texture and organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 24 (7): 675-683.
- Khan, M. & Schullion, J. 2002. Effects of metal (Cd, Cu, Ni, Pb or Zn) enrichment of sewage-sludge on soil micro-organisms and their activities. *Applied Soil Ecology*. 20: 145-155
- Kuzyakov, Y; Friedel, J.K.& Stahr, K. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biol. and Bioch.* 32: 1485-1498
- Maestres, F.T.& Cortina, J. 2003. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Ecology*. 23: 199-209.
- Maly, S.; Sarapatka, B. & Krskova, M. 2002. Seasonal variability in soil N mineralization and nitrification influenced by N fertilization. *Roslinná Vyroba*, 48(9): 389-396. <http://www.cazv.cz/clanky/rv9-02/maly.pdf>
- Mc Gill, W. B.; Cannon, K. R.; Robertson, J. A. & Cook, F., 1986. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C. In Breton L. after 50 years of cropping to two rotations. *Can J. Soil Sci.* 66: 1 – 19.
- Ortiz, O. i Alcañiz, J.M. 2003. Transcatalonia 2002. Els sòls de les muntanyes de prades i del sector SE d'Osona. *Quaderns Agraris*. 28: 109-118
- Oztas, T. 2002. Soil Degradation and Assessment of Soil Quality. http://www.toprak.org.tr/isd/can_82.htm
- Page, A. L. & Chang, A. C. 1994. Overview of the Past 25 years: Technical Perspective. Pages 3 – 6 in C.E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy, editors. *Sewage Sludge: land utilization and the environment*. American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI.
- Parkin, T.B.; Doran, J.W. & Franco-Vizcaino, E. 1996. Field and laboratory tests of soil respiration. In *Methods for Assessing Soil Quality*, SSSA Special Publication 49.
- Parr, J.F.; Gardner, W.R. & Wildung, R.E. 1981. Water potential relations in soil microbiology. *Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ.* N^o 9. SSS, Madison, WI.
- Pascual, J.; Hernández, T. García, C. & García, A. 1998. Changes in the organic matter mineralization rates of an arid soil after amendment with organic wastes. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 12: 63-72.
- Raubuch, M. & Joergensen, R.G. 2002. C and net N mineralization in a coniferous forest soil: the contribution of temporal variability of microbial biomass C and N. *Soil Biol. & Biochem.* 34: 841-849.
- Rayment, M.B. & Jarvis, P.G. 1999. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biol. Biochem.* 32: 35-45
- Rice, Ch.W.; Moorman, Th.B. & Beare, M. 1996. Role of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Soil Quality. In *Methods for Assessing Soil Quality*, SSSA Special Publication 49.
- Röver, M. & Kaiser, E-A. 1999. Spatial heterogeneity within the plough layer: low and moderate

- variability of soil properties. *Soil Biol. Biochem.* 31: 175-187.
- Selivanovskaya, S.Yu.; Latypova, V.Z.; Kiyamova, S.M. & Alimova, F.K. 2000. Use of microbial parameters to assess treatments methods of municipal sewage sludge applied to grey forests soils of Tatarstan. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 86: 145–153
- Smith, O. L. 1979. An analytical model of the decomposition of soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 11: 585-606.
- Sparling, G.P. 1992. Ratio of Microbial Biomassa Carbon to Soil Organic Carbon as a sensitive indicator of changes in Soil Organic Matter. *Aust. J. Soil. Res.* 30: 195-207
- Tate, R.J. 1987. Soil organic matter. Biological and ecological effects. John Wiley & Sons. NY.
- Tian, G.; Salako, F.K.; Ishida, F. & Zhang, J. 2001. Biological restoration of a degraded alfisol in the humid tropics using woody fallow: synthesis of 8-year-results. In: D.E Scott, R.H. Mohtar & G.C. Steinhardt (eds). 200. Sustaining the Global Farm. Selected papers from 10th International Conservation Organization Meeting held May 24-29, 1999. Purdue University and the USDA-ars National Soil Erosion Laboratory.
- Van Lynden, G.W.J. 1997. Guidelines for the assessment of soil degradation in Central and Eastern Europe. Report 97/08b (rev. ed.), FAO-ISRIC. 2000, Wageningen, pp. 20.
- Wardle, D.A. & Ghani, A. 1995. A critique of the microbial metabolic quotient (qCO_2) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. *Soil Biol. Biochem.* 27 (12): 1601-1610.
- Wardle, D.A. 1998. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: A global-scale synthesis. *Soil Biol. Biochem.* 30 (13): 1627-1637
- Watts, C.W.; Eich, S. & Dexter, A.R. 2000. Effects of mechanical inputs on soil respiration at the aggregate and fields scales. *Soil & Tillage Research.* 53: 231-243.

CAPÍTOL 4

ELS FANGS COM A SUBMINISTRADORS DE NITROGEN: DINÀMICA DEL NITROGEN

EN ELS SÒLS FORESTALS ADOBATS

4.1 INTRODUCCIÓ

Els incendis forestals i l'abandonament de conreus presenten sovint problemes relacionats amb l'empobriment del sòl, la seva qualitat i funcionalitat. Una de les principals causes de la degradació del sòl és la pèrdua o esgotament de nutrients i consegüentment la dificultat de desenvolupar una coberta herbàcia que el protegeixi front a l'erosió (Whitford *et al.*, 1989; White *et al.*, 1997). El nitrogen és un nutrient essencial pel creixement de les plantes i, per tant, pot ser un component crític dels sòls degradats. El nitrogen del sòl prové de diverses fonts, entre les quals podem destacar la fixació biològica, on el dinitrogen atmosfèric (N_2) és fixat per microorganismes que l'incorporen a la biomassa microbiana i, també, pels simbiòntics (diazotrofs) que viuen a l'interior dels nòduls de les rels de les plantes lleguminoses. Altres entrades es produeixen per la deposició de restes vegetals i animals, i per les aportacions antròpiques amb les cada cop més freqüents pràctiques de fertilització. Dels macronutrients del sòl, el nitrogen és un element que es troba principalment en formes orgàniques complexes (Broadbent, 1986). Aquestes, es troben en forma d'aminoàcids, proteïnes, aminosucres i en altres molècules complexes que es produeixen en la reacció de l'amoni amb la lignina i de la polimerització de quinones, així com de la condensació de sucres i amines. Un altre grup molt estable de formes de nitrogen són els aminoàcids i proteïnes, que es troben en combinació amb argiles i altres minerals.

La figura 4.1 representa de manera simplificada el cicle de nitrogen al sòl.

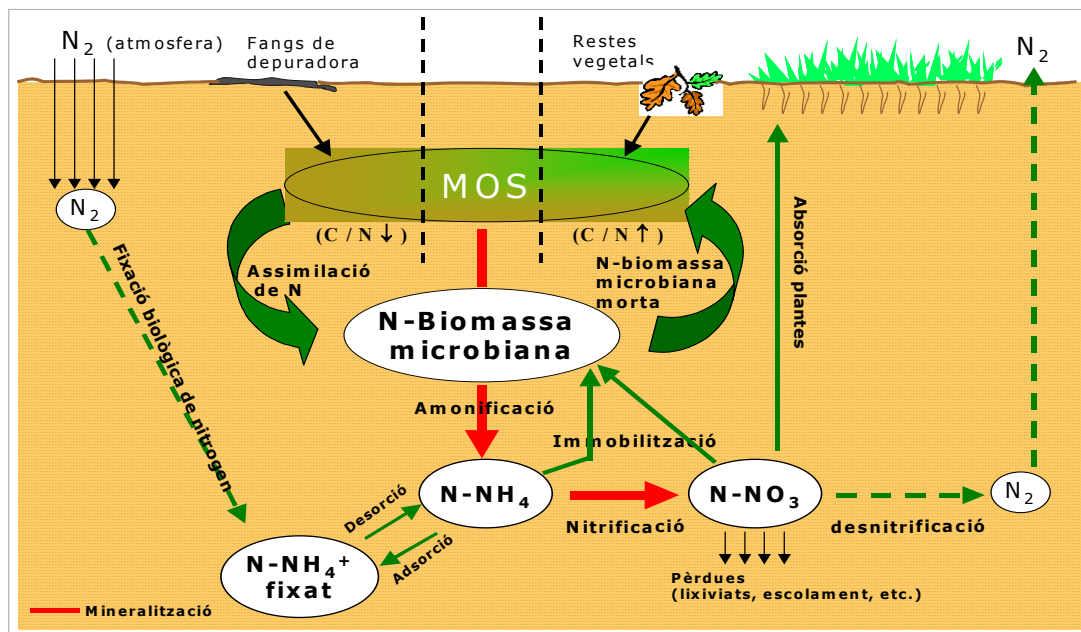


Figura 4.1 cicle de nitrogen al sòl. Elaboració pròpia a partir de Stevenson (1986)

Atès que els fangs són una font important de nitrogen pel sòl hem centrat aquest estudi en: a) el nitrogen total, com a indicador de la quantitat de nitrogen provinent dels fangs que incorporen els sòls tractats; b) el nitrogen amoniacal ($N-NH_4$) com a primer producte de la mineralització del nitrogen orgànic; c) nitrogen de nitrat ($N-NO_3$) com a producte final majoritari de la transformació aeròbia dels compostos nitrogenats; d) el nitrogen mineral a partir de la suma del nitrogen amoniacal i del nitrat ($N-NH_4+N-NO_3$).

És important destacar que els fangs de depuradora al ser residus molt rics en matèria orgànica i nitrogen solen presentar relacions C/N inferiors a 10 i, per tant, esperarem una disminució de la relació C/N del sòl. Per contra, les restes vegetals aportades per trituració de la biomassa, al ser un material més recalcitrant i relativament pobre en nitrogen, provocaran l'efecte contrari.

A la taula 4.1 estan resumides les principals formes nitrogenades al sòl.

Taula 4.1. Composició de les formes nitrogenades al sòl (Anderson et al., 1989).

Forma del Nitrogen	% del Nitrogen total
amoniacal	21 ± 5
aminoacídic	38 ± 7
aminosucre	6 ± 2
purines i pirimidines	0.4 ± 0.1
hidrolitzable no identificat	17 ± 6
no hidrolitzable	14 ± 6
nitrats	3 ± 5

Una de les principals raons de la importància de la matèria orgànica del sòl en l'ecosistema resulta del paper que desenvolupa com a font, entre altres, de nitrogen (Tate,

1987) i, per tant, la quantitat i naturalesa de la mateixa tindrà una gran influència en la disponibilitat d'aquest element. Els elements nutritius continguts dins de les partícules coloidals de la matèria orgànica no són disponibles directament per les plantes i han de ser transformats en formes minerals. El conjunt de processos que es produeixen en la transformació d'aquests compostos orgànics a formes inorgàniques (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-) s'anomena mineralització i és dut a terme per una part important dels microorganismes del sòl, dins dels anomenats heterotròfics. La mineralització dels compostos nitrogenats es produeix mitjançant l'amonificació amb l'alliberació de compostos amoniacals i la nitrificació. Els dos primers processos els realitzen microorganismes heterotròfics, que utilitzen el carboni orgànic com a font d'energia i, per tant, alliberen CO_2 a l'atmosfera del sòl. La nitrificació, per contra, la realitzen un grup més reduït de bacteries autòtrofes, que obtenen l'energia de l'oxidació de sals inorgàniques i el carboni del CO_2 de l'atmosfera del sòl. Per tant, l'amoni alliberat en les primeres etapes de la descomposició de la matèria orgànica pot ser: a) transformat en nitrits i nitrats en el procés de nitrificació, b) absorbit directament per les plantes, c) immobilitzat com a biomassa microbiana, d) fixat en les xarxes minerals de determinats tipus d'argiles, principalment il·lites i vermiculites, i e) volatilitzat cap a l'atmosfera. La nitrificació es produeix en dues etapes, primer l'amoni és transformat en nitrit (NO_2^-) pel grup de bacteries autòtrofes (*Nitrosomes*) i a continuació en nitrat (NO_3^-) pel grup de bacteries autòtrofes (*Nitrobacter*) entre d'altres. El nitrat produït pot ser: a) absorbit per les plantes o d'altres microorganismes, b) immobilitzat, c) perdre's per desnitrificació química o biològica i d) rentat, bé sigui amb l'aigua d'escolament superficial, o per lixiviació.

La taxa de mineralització del nitrogen depèn de les característiques químiques de la matèria orgànica (Mary *et al.*, 1996; Côte *et al.*, 1999) i de factors externs com la temperatura, la humitat i el tipus de sòl (Myers, *et al.*, 1982; Broadbent, 1986; Breland, 1994). Simultàniament a la mineralització es produeix l'immobilització, on el nitrogen mineral és transformat en biomassa.

Els fangs de depuradora contenen gran quantitat de matèria orgànica làbil (Sommers, 1977) i, per tant, poden produir efectes positius relacionats amb la fertilitat del sòl, particularment com a restablidors del nitrogen i fòsfor mineral (Smith, *et al.*, 1997). L'alt contingut de nitrogen en la matèria orgànica dels fangs (Sommers, 1977; Werther i Ogada, 1997) converteix aquests productes en un bon fertilitzant nitrogenat (Bernal *et al.*; 1998), ja que, per una banda incrementa la dotació de nitrogen del sòl i per altra pot ajudar a disminuir la relació C/N dels sòls rics en restes vegetals de resinoses, ericàcies i d'altres plantes d'ambients oligotròfics. La taxa de nitrificació del sòl incrementa amb l'ús

de fertilitzants orgànics respecte als fertilitzants minerals (Wheatley, 2001). L'addició d'un substrat amb una relació C/N superior a 30 provoca la immobilització neta del nitrogen i, al contrari, relacions menors a 20 n'afavoreixen la mineralització. La mineralització dels components orgànics nitrogenats dels fangs pot provocar una ràpida alliberació de nitrats (Tate, 1987). Una entrada extra de nitrogen inicialment incrementarà la producció de biomassa en ecosistemes limitats pel nitrogen (*N-limitants*), però ulteriorment s'alliberarà per nitrificació. En aquests casos, la nitrificació es pot considerar com un procés nociu (Priha, 1995), ja que part del nitrat no absorbit per les plantes o immobilitzat es pot perdre per lixiviació i, per tant, pot esdevenir un contaminant potencial dels ecosistemes aquàtics adjacents, o en el millor dels casos ser eliminat del sòl per desnitrificació. Tot això demostra que el cicle del nitrogen és molt complex i està regulat per un conjunt de processos que tendeixen a evitar l'acumulació en formes minerals al sòl. L'àrea mediterrània es caracteritza per una primavera i tardor plujosa, moment en que el sòl presenta unes condicions de temperatura i humitat òptimes que afavoreixen especialment la mineralització. Al mateix temps, però, és quan hi ha també més rentat superficial, ja que normalment les pluges es concentren en períodes de temps curts. Aquesta coincidència en el temps fa que sigui important estudiar les variacions temporals del nitrogen del sòl.

El grau d'estabilitat de la fracció orgànica i la quantitat de N orgànic que contenen els fangs són determinats pel procés de tractament (Boyle, 1990). Varis exemples han estat descrits per Smith, *et al.*, (1997), on les digestions mesofíliques anaeròbiques alliberen NH_4^+ com a producte de la mineralització de la matèria orgànica i únicament els components orgànics més recalcitrants romanen. L'eliminació de l'aigua (deshidratació) provoca efectes físics sobre les proporcions relatives de nitrogen orgànic i inorgànic contingut en els fangs amb l'eliminació de N- NH_4 soluble a la fase aquosa que marxa amb les aigües depurades. Per contra, el nitrogen contingut en els fangs no tractats es troba principalment en forma orgànica, i donat que no han rebut cap tractament d'estabilització, la matèria orgànica al aplicar-la al sòl és molt més susceptible a la descomposició microbiana.

Els problemes deguts a substàncies potencialment tòxiques contingudes en els fangs frescs (Banerjee *et al.*, 1997; Ronald, 1998; Rauch i Becker, 2000), fa necessari el tractament d'aquests residus per tal de reduir els problemes ambientals i de salubritat. El compostatge i l'assecatge tèrmic d'aquests materials pot resoldre part dels problemes que es relacionen amb l'elevat nombre de patògens que contenen.

L'objectiu d'aquest treball es avaluar si l'aportació de nitrogen contingut en els fangs produeix algun desequilibri important o persistent en el cicle d'aquest element en els dos sòls forestals que es volen regenerar. Per tant caldrà estudiar la dinàmica (o variació

temporal) del nitrogen en els dos sòls formats sobre diferent material parental i sota les mateixes condicions climàtiques, que han estat fertilitzats amb tres tipus de fang de depuradora.

Aquest estudi es centrarà en:

La comparació de l'evolució dels nivells de nitrogen total i mineral (N-NH_4 i N-NO_3) dels sòls esmenats amb els tres tipus de fang de depuradora a mitjà termini (13 mesos).

Analitzar les diferències en la disponibilitat de nitrogen en funció del tipus de fang usat com a fertilitzant, i els efectes provocats per factors externs, que poden ser determinants a l'hora d'interpretar les variacions temporals del nitrogen inorgànic.

Avaluar la producció de nitrats i la seva acumulació al sòl, com a punt crític d'aquest treball donades les conseqüències ambientals exposades en la introducció.

4.2 MATERIAL I MÈTODES

La localització exacte, distribució de les parcel·les, caracterització dels sòls i els materials, etc. ha estat descrit en els capítols 1, 3 de la tesi.

Al capítol 3 (veure taules 3.2 i 3.3) s'han presentat els resultats d'alguns paràmetres rellevants dels sòls i els fangs emprats en aquest experiment des del punt de vista de l'estudi del nitrogen.

Es important destacar algunes propietats dels sòls, principalment la diferència de textures, sobretot en la fracció fina, llims i argiles. L'elevat pH dels sòls del Puig, front al pH neutre des sòls de la Vallmitjana, reflecteixen l'elevat contingut en carbonat càlcic del primer, com també es pot veure en la caracterització d'aquest sòl descrita al capítol 3. També hi ha diferències en el contingut i qualitat del carboni orgànic i, per tant la relació C/N es mes alta en els sòls del Puig. S'ha de dir, però, que en els sòls de la Vallmitjana abans de l'aplicació dels fangs, i després de la caracterització dels sòls, es van quedar esteses per la superfície del sòl les restes del material vegetal triturat i, per tant, és lògic que el quocient C/N del sòl sigui més alt.

Pel que fa als fangs, les diferències en el contingut d'aigua i en la densitat aparent, ja han estat discutides en els capítols precedents. Si be pràcticament no s'observen diferències en el contingut de nitrogen total dels diferents fangs, les formes de nitrogen inorgànic (N-NH_4 i N-NO_3) sí que varia. Així, l'amoni és més abundant en els fangs frescs ($4,07 \pm 0,17 \text{ mg g}^{-1} \text{ sms}$) i d'assecatge tèrmic ($4,42 \pm 1,25 \text{ mg g}^{-1} \text{ sms}$) i, els nitrats en els fangs compostats ($23,7 \pm 0,1 \text{ mg g}^{-1} \text{ sms}$) si bé en tots ells, la proporció de nitrogen mineral és petita.

4.2.1 DISSENY D'EXPERIMENTS

El disseny experimental ha estat ja descrit en el capítol anterior. Amb la instal·lació de les parcel·les es pretén avaluar l'efecte de tres tipus de fangs sobre dos sòls ben contrastat en una mateixa àrea geogràfica.

A cada una de les 32 parcel·les repartides entre les dues localitats, la Vallmitjana i el Puig (veure capítol 3) s'ha determinat el nitrogen total, el nitrogen amoniacal i el que es troba en forma de nitrat o nitrit (aquest darrer minoritari), seguint el calendari ja descrit (taula 3.5).

4.2.2 PARÀMETRES ANALITZATS

Per tal d'interpretar la dinàmica temporal del nitrogen al sòl s'ha tingut en compte la informació meteorològica (capítol 3), ja que aquesta és molt dependent de les fluctuacions climàtiques (Jensen *et al.*, 1997) i dels canvis estacionals en relació també als períodes de creixement de la vegetació (Wheatley *et al.*, 2001).

4.2.2.1 FORMES DE NITROGEN AL SÒL

El nitrogen total s'ha analitzat sobre una mostra de sòl sec pel mètode Kjeldahl (Bremner i Mulvaney, 1982) en procediment semi automatitzat.

La concentració de nitrats al sòl s'ha mesurat mitjançant la determinació del nitrogen de l'amoni (N-NH₄) i del nitrat (N-NO₃) a partir d'un l'extracte fet amb K₂SO₄ (0,5 M) en una relació pes/volum d'1:4. Les extraccions sempre es van realitzar sobre la mostra fresca, o conservada a 4°C durant un temps màxim de 24 hores. Es va determinar també, en paral·lel, el contingut d'humitat de la mostra per gravimetria per tal d'expressar les concentracions de nitrats i d'amoni sobre sòl sec.

4.2.2.1.1 NITROGEN TOTAL

El contingut de nitrogen total dels sòls estudiats s'ha determinat per digestió sulfúrica emprant un bloc TECATOR 1015 i un destil·lador Büchi K-314 d'acord amb el mètode Kjeldhal (Bremner i Mulvaney, 1982).

4.2.2.1.2 NITROGEN MINERAL

L'amoni i el nitrat s'han determinat mitjançant una anàlisi colorimètrica per injecció en flux (*Flow Injection Analysis, FIA*) amb l'aparell FIAstar[®] 5012 SYSTEM, que disposa de dos canals, un pel NO₃ i un pel NH₄. El protocol d'anàlisi ha estat descrit en el capítol 1.

4.2.3 TRACTAMENT DE DADES

S'han treballat les dades tenint en compte els dos factors que intervenen: sòl (La Vallmitjana = arenó; el Puig = franca) i tractament (control, fang fresc =F, fang compostat =C i fang assecat tèrmicament =T).

La comparació entre aquests factors, per a cada un dels paràmetres analitzats, s'ha fet mitjançant una ANOVA d'un factor a dos nivells, (p valor <0,05). El test PLSD de Fisher s'ha aplicat en aquells casos en que hi havia diferències significatives.

També s'ha fet una ANOVA de mesures repetides, agrupant la sèrie de dades en dos grups. Un primer grup que va des del primer al quart mostreig (vuit setmanes de

mostrejos) efectes immediats i un segon grup que integra les dades dels tres darrers mostrejos (des de la 17a setmana a la 61a setmana) efectes a mitjà termini.

4.4.RESULTATS

4.4.1 FORMES DE N AL SÒL

4.4.1.1 NITROGEN TOTAL

Amb la caracterització dels materials emprats (taula 3.3) s'ha pogut veure que els fangs tenen un alt contingut de nitrogen total. Tot i que es va fer una aplicació superficial i en una dosi moderada, a la figura 4.2 s'observa com en els sòls adobats hi ha un increment en el nitrogen total del sòl, sent sempre majors els nivells a les parcel·les esmenades que a les parcel·les control ($p=0,0031$).

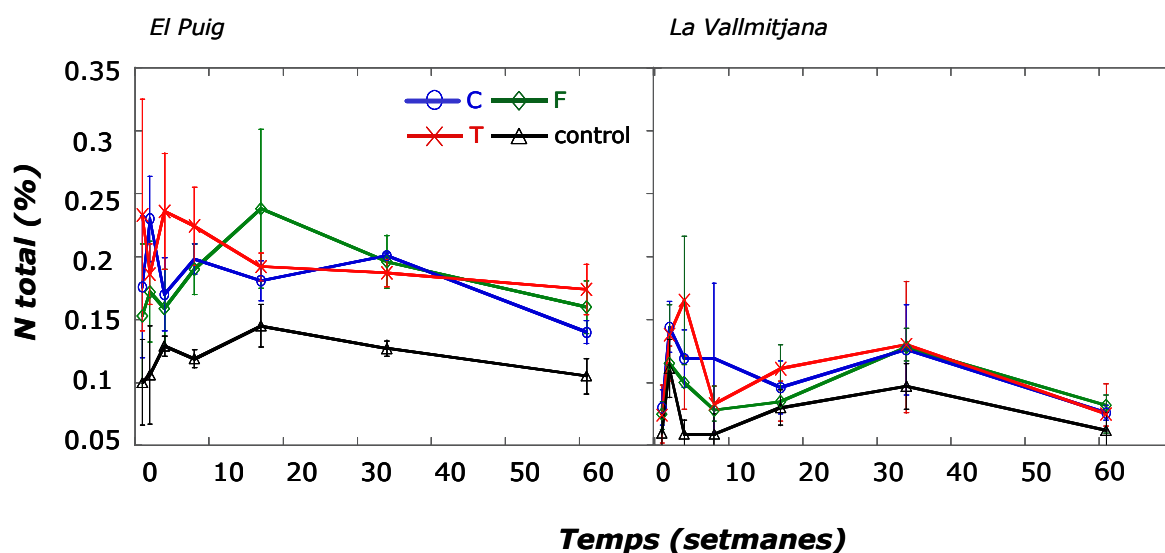


Figura 4.2. Variació temporal del Nitrogen total a les parcel·les de La Vallmitjana (sòl de gresos) i el Puig (sòl de margues). \pm SD

En les parcel·les adobades, immediatament després de l'aplicació, no s'observen diferències segons el tipus de fang aplicat ($p=0,1323$), ja que el contingut de nitrogen total dels fangs és molt similar ($N_{total} = 41,56 \pm 6,9 \text{ g Kg}^{-1}$). No obstant, és interessant destacar que, tot i haver aplicat la mateixa quantitat de fang als dos sòls, els continguts de nitrogen total dels sòls del Puig a l'inici són més elevats ($p=0,0054$). Quan estudiem la dinàmica en els dos primer mesos des de l'aplicació, observem tal com demostra l'ANOVA de mesures repetides que els dos factors són els causants de les diferències observades al moment de l'aplicació (tipus de sòl: $p < 0,0001$; fang: $p < 0,0001$) i que, sent les interaccions no significatives, la dinàmica d'aquest paràmetre segueix el mateix patró independentment del tipus de sòl o de tractament. A partir del segon mes, es continuen observant les

mateixes diferències, amb nivells de nitrogen total sempre superiors en els sòls esmenats en comparació als dels respectius controls.

A la figura 4.3 estan representats els resultats del quocient C/N. L'anàlisi de la variància ens ha permès estudiar l'efecte de l'addició dels fangs sobre aquest quocient.

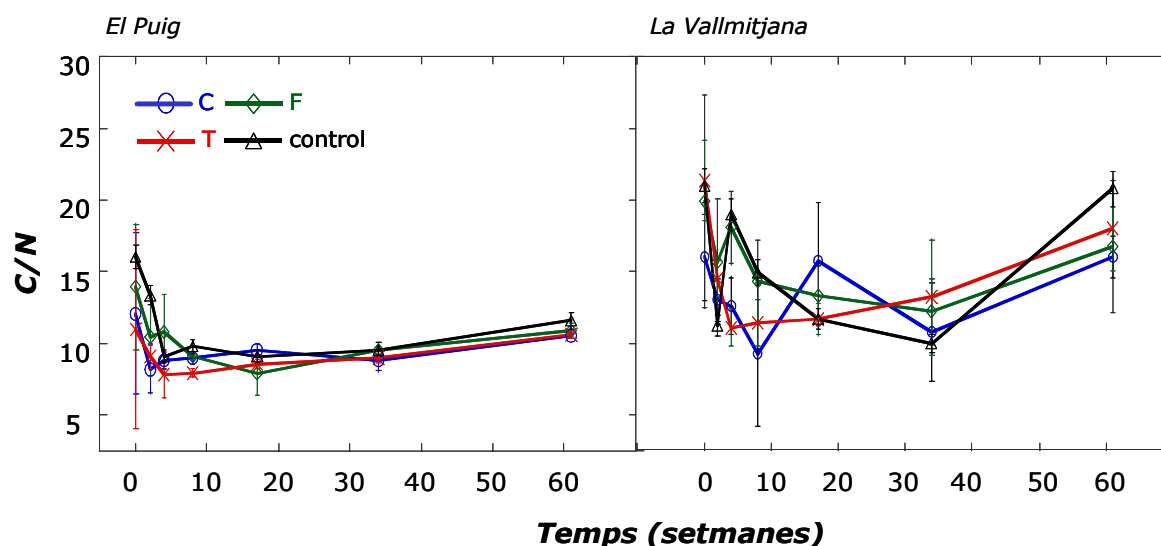


Figura 4.3. Variació temporal del quocient C/N a les parcel·les de La Vallmitjana (sòl de gresos) i el Puig (sòl de margues). \pm SD

Donat que ens interessa estudiar-ne la seva variació temporal, hem agrupat les dades dels quatre primers mostrejos, és a dir durant un període de dos mesos des de l'aplicació dels fangs. L'ANOVA de mesures repetides de dos factors ens permet demostrar que hi ha una clara diferència entre els dos sòls ($p < 0,0001$), amb una relació C/N menor en els sòls de textura franca (10,4 \pm 3,5) que en els de textura arenosa (16,6 \pm 4,6). També s'ha pogut demostrar, tot i la gran variabilitat existent, que els sòls que han rebut fangs tenen el quocient C/N significativament inferior ($p = 0,0086$) als respectius controls. Les interaccions d'aquests dos factors, excepte per la categoria "temps" ($p < 0,0001$) no resulten ser significatives i, per tant, demostra que tots els sòls tractats segueixen un mateix patró en els dos primers mesos després de l'aplicació dels fangs.

Al estudiar les diferències entre els tres tipus de fang, observem que el sòl continua sent un factor significatiu ($p < 0,0001$), sent molt més accentuades les diferències en els sòls de textura franca (el Puig) on l'efecte del fang és més evident, i que també el tipus de fang determina la variació d'aquest quocient ($p = 0,0316$), amb una relació C/N menor en els sòls esmenats amb fang compostat (El Puig: 9,5 \pm 2,9; La Vallmitjana: 14,3 \pm 3,5) i tèrmic (El Puig: 8,9 \pm 3,3; La Vallmitjana: 15,9 \pm 4,1) que la dels sòls esmenats amb fang fresc, on el quocient es significativament superior (El Puig: 11,1 \pm 3,1; La Vallmitjana: 18,2 \pm 4,4).

Passats els dos mesos, l'ANOVA de mesures repetides de la categoria temps (5-7 mostreig), és a dir dels tres darrers mostrejos, demostra que hi continua havent diferències significatives entre els dos sòls ($p < 0,0001$). Per contra, les diferències que hi havia entre els sòls esmenats i els respectius controls han desaparegut ($p = 0,5858$).

4.4.2.2 NITROGEN AMONICAL

Els sòls esmenats incrementen la concentració d'amoni respecte als controls, com es pot veure a la figura 4.4. Als primers estadis després de l'aplicació s'observa un marcat pic inicial (especialment al Puig) i una gran variabilitat en quant a la concentració d'amoni en els sòls tractats.

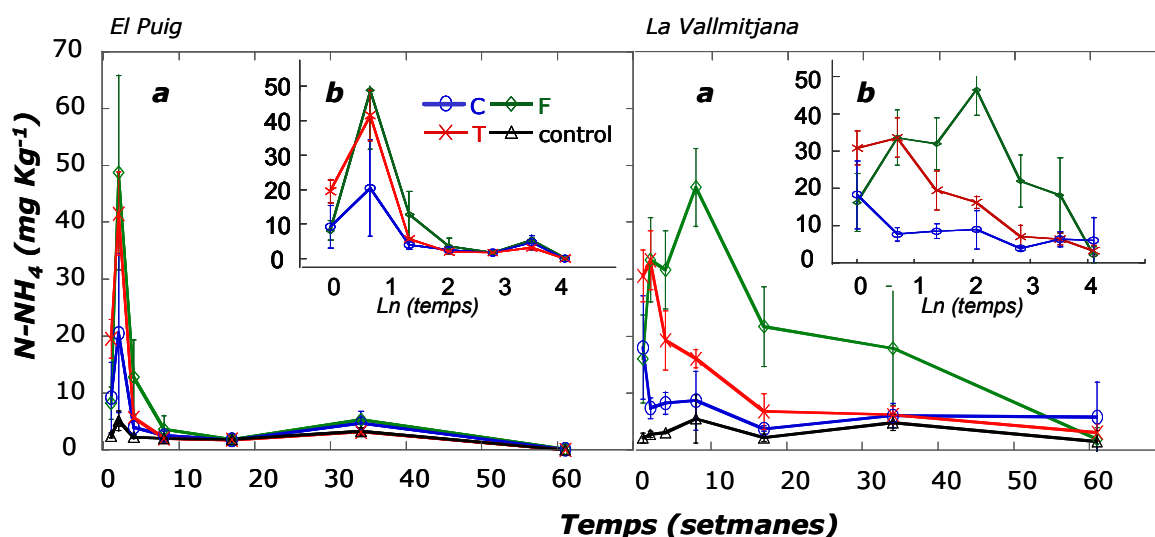


Figura 4.4. Variació temporal del nitrogen amoniacal (N-NH₄) a les parcel·les de La Vallmitjana (sòl de gresos) i el Puig (sòl de margues). \pm SD.

a) temps real ; b) temps expressat pel seu Ln

Donada aquesta gran variació que es produeix en els dos primers mesos, s'han agrupat les dades en dues categories de temps. En la primera categoria, que va del primer al quart mostreig, la concentració d'amoni al sòl depèn del tipus de sòl, com demostra l'ANOVA de mesures repetides (tipus de sòl: $p = 0,0002$). També s'observa que hi ha diferències segons el tipus de tractaments (tractament: $p < 0,0001$), entre els diferents mostrejos (temps: $p < 0,0001$) i en les possibles interaccions (temps*tractament: $p < 0,0001$; temps*sòl: $p < 0,0001$; temps*tractament*sòl: $p = 0,0003$). A la figura 4.4b, a l'haver transformat el temps amb el seu Ln, es poden individualitzar bé els set mostrejos. A la Vallmitjana inicialment hi ha un clar increment en la concentració d'amoni en totes les parcel·les esmenades, amb valors més alts en les de fang tèrmic ($30,9 \pm 4,57$ mg Kg⁻¹), seguit amb valors similars el compostat ($18,3 \pm 9,1$ mg Kg⁻¹) i el fang fresc ($16,3 \pm 7,7$ mg Kg⁻¹). A partir del segon mostreig, l'amoni en les parcel·les amb fang tèrmic comença a disminuir de

manera exponencial, però continua sent significativament superior al compostat i al control. El fang fresc, té un comportament diferent a la resta, ja que l'amoni es va formant més lentament i va incrementant fins arribar al valor màxim ($46,6 \pm 6,8 \text{ mg Kg}^{-1}$) en el quart mostreig, moment en que comença a disminuir. A partir del segon mes, els resultats de l'ANOVA de mesures repetides de la categoria de temps 5-7è mostreig, demostren la gran diferència entre els dos sòls ($p < 0,0001$), i que, com observàvem a la figura 4.4 la producció d'amoni s'estabilitza molt abans en els sòls de textura franca, mentre que els sòls de textura arenosa presenten encara diferències significatives ($p < 0,0001$) segons el tipus de fertilitzant, sent les parcel·les esmenades amb fang fresc les que presenten els nivells més alts ($13,6 \pm 11,3 \text{ mg Kg}^{-1}$) seguit de les de fang tèrmic ($5,6 \pm 2,7 \text{ mg Kg}^{-1}$), compostat ($5,6 \pm 3,6 \text{ mg Kg}^{-1}$) i els sòls no esmenats ($2,9 \pm 2,0 \text{ mg Kg}^{-1}$). Aquests valors són la mitjana dels tres darrers mostrejos, per això la desviació estàndard és tan gran, sobretot en les parcel·les amb fang fresc.

Pel que fa a les parcel·les del Puig, a la primera setmana el nitrogen amoniacal és en tots els tractaments inferior al dels sòls de la Vallmitjana. L'increment es produeix en tots dos sòls esmenats a partir del segon mostreig, assolint en tots els casos els nivells màxims, amb valors superiors en les parcel·les amb fang fresc ($48,8 \pm 17,1 \text{ mg Kg}^{-1}$) seguit del tèrmic ($41,5 \pm 7,4 \text{ mg Kg}^{-1}$) i molt per sota el compostat ($20,5 \pm 13,9 \text{ mg Kg}^{-1}$). A partir del segon mostreig, en tots els casos, comença a disminuir la concentració de nitrogen amoniacal, fins arribar a estabilitzar-se només en dos mesos i, per tant, molt abans que els sòls de textura arenosa. En aquest cas l'ANOVA de mesures repetides dels tres darrers mostrejos demostra que no hi ha diferències entre els tractaments ($p = 0,1397$).

El fet que en tots els tractaments, els nivells d'amoni s'hagin estabilitzat al cinquè mostreig (excepte en el cas del fang deshidratat a la Vallmitjana, que manté sempre una concentració de N-NH_4 més elevada) explica les interaccions significatives que resulten de l'ANOVA de mesures repetides (sòl*tipus de fang: $p = 0,0004$; temps*tipus de fang: $p = 0,0024$; temps*tipus de fang*sòl: $p = 0,0040$), i ens està indicant que no només hi ha diferències entre els factors que actuen, sinó que a més el patró temporal que segueixen també és diferent.

4.4.2.3 NITROGEN DE NITRAT

És interessant estudiar la dinàmica temporal del nitrogen en forma de nitrat, ja que és el producte final de la transformació de l'amoni per part dels bacteris autotròfics del sòl. A la figura 4.5 es presenta la dinàmica temporal d'aquesta forma de nitrogen.

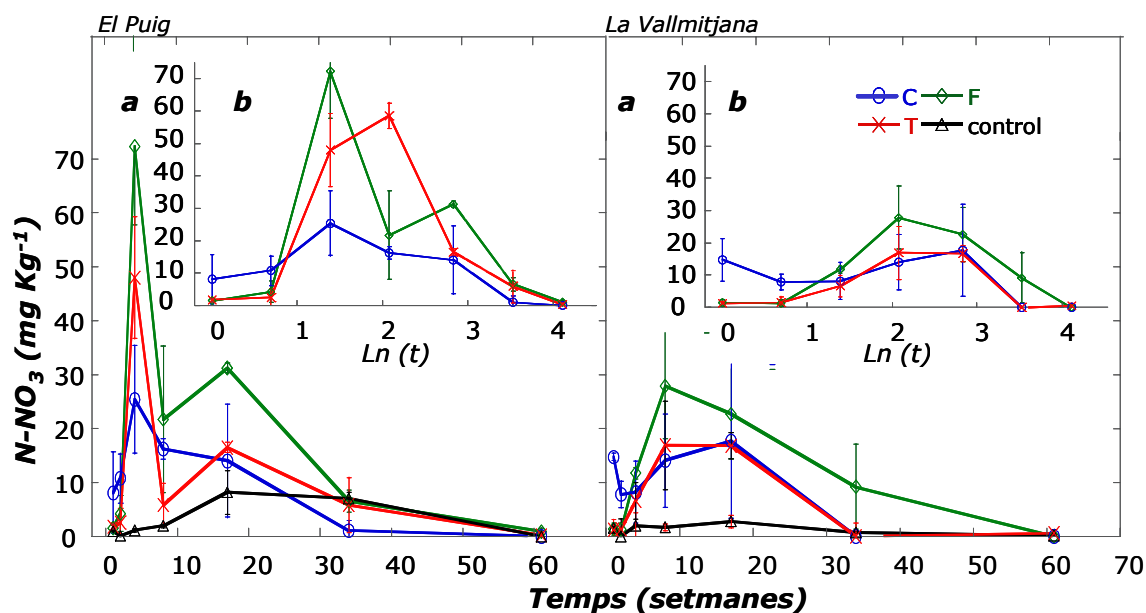


Figura 4.5 Variació temporal del nitrogen de nitrat (N-NO₃) a les parcel·les de La Vallmitjana (sòl de gresos) i el Puig (sòl de margues). \pm SD.

a) temps real ; b) temps expressat pel seu Ln

En primer lloc, s'observa una gran diferència d'escala entre els dos sòls, assolint-se nivells molt superiors en les parcel·les del Puig. S'ha fet la mateixa operació agrupant els primers quatre mostrejors en una única categoria. L'ANOVA de mesures repetides ens permet identificar les diferències entre tractaments, sòls i mostrejors (tractament: $p < 0,0001$; sòl: $p = 0,0002$; tractament*sòl: $p = 0,0092$; temps i les possibles interaccions d'aquest: $p < 0,0001$). Al moment de l'aplicació en les parcel·les que han estat fertilitzades amb fang compostat, ja es detecten nitrats al sòl ($14,7 \pm 6,6$ mg Kg⁻¹). A la figura 4.5b, al fer la transformació pel Ln del temps, es pot observar bé com als sòls de textura arenosa, en les parcel·les esmenades amb fang fresc i d'assecatge tèrmic, el nitrat al sòl va incrementant lentament, arribant a assolir el màxim als dos mesos després de l'aplicació (fresc: $27,9 \pm 9,7$ mg Kg⁻¹; tèrmic: $16,9 \pm 8,2$ mg Kg⁻¹). A partir d'aquest moment comencen a disminuir els nivells en tots els tractaments, molt més ràpidament en les parcel·les amb fang tèrmic i compostat, on a la 34ena setmana, finals de tardor, pràcticament ha desaparegut del tot. Per contra, en les parcel·les amb fang fresc, que com ja havíem vist anteriorment la mineralització del nitrogen és més lenta, el nitrat es manté en concentracions elevades més temps al sòl, fins arribar a desaparèixer a la 61ena setmana, després d'un any de l'aplicació. Als sòls de textura franca (el Puig), s'observa com incrementa el contingut de nitrat al sòl en un mes, amb valors més alts en els esmenats amb fang fresc ($72,28 \pm 17,5$ mg Kg⁻¹), seguit del tèrmic ($48,0 \pm 11,3$ mg Kg⁻¹) i molt per sota el compostat ($25,4 \pm 9,9$ mg Kg⁻¹). És interessant observar com al cinquè mostreig (17ena

setmana), a mitjans de setembre, hi ha un lleuger increment de la nitrificació i, que aquest es produeix en tots els tractaments, amb l'excepció del fang compostat. A partir d'aquest moment, igual com passava en els sòls de textura franco - arenosa (La Vallmitjana) es produeix el descens en la concentració de nitrats, fins a desaparèixer.

4.4.2.4 NITROGEN MINERAL ⁴⁵ (N-NH₄ + N-NO₃)

A la figura 4.6 es representa la dinàmica del nitrogen mineral, calculat a partir de la suma del nitrogen amoniacal i de nitrat (N-NH₄ + N-NO₃). Per tal d'apreciar bé els canvis que es produeixen en cada un dels mostrejos, al llarg del període estudiat, hem aplicat el Ln del temps a l'eix d'abscisses.

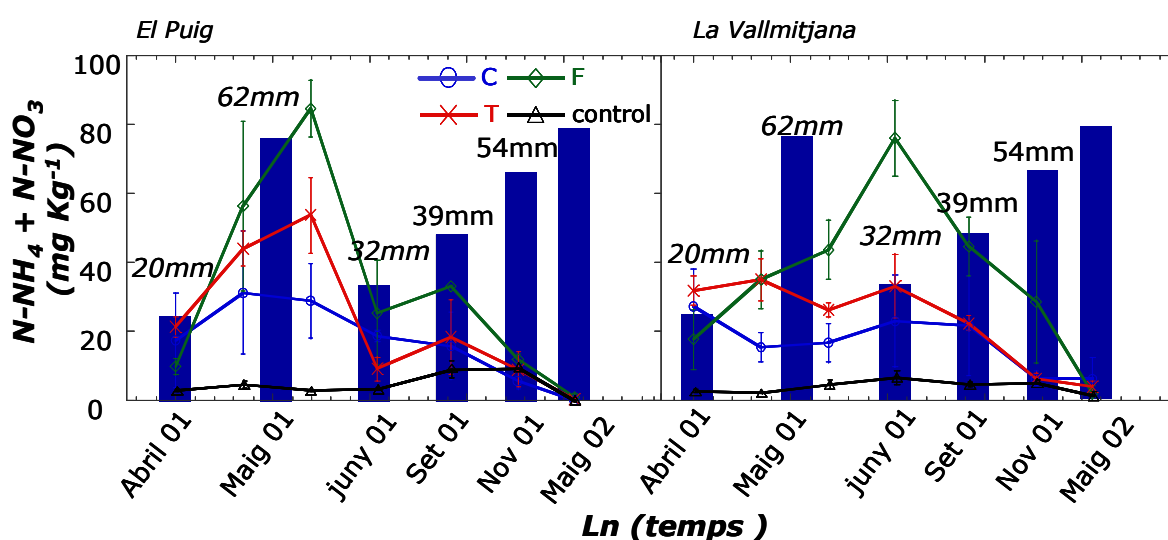


Figura 4.6 Variació temporal (Ln temps) del nitrogen mineral (N-NH₄ + N-NO₃ mg Kg⁻¹) a les parcel·les de La Vallmitjana (sòl de gresos) i el Puig (sòl de margues). ± SD.

A l'eix d'abscisses els mesos en que s'ha mostrejat. L'equidistància entre els punts es deu al fet que hem aplicat el Ln del temps. Les barres representen la pluïa acumulada en els mesos en que s'ha mostrejat.

Primer de tot s'observa que la mineralització del nitrogen presenta una marcada variació temporal i, que aquesta es produeix de manera idèntica independentment del tipus de fang aplicat. És important, també, destacar com en termes generals la mineralització neta és la mateixa en els dos sòls ($p=0,4607$). L'ANOVA de mesures repetides d'un factor a dos nivells de la categoria de temps 1-4 ens confirma aquesta apreciació, ja que el sòl no

⁴ Donat que els processos de mineralització i immobilització es produeixen al mateix temps, no podem saber amb exactitud la quantitat de nitrogen mineralitzat, ja que part d'aquest es pot haver immobilitzat. Per tant, els valors de concentració de les dues formes de nitrogen mineral estudiades (N-NH₄ + N-NO₃) són una subestimació de la mineralització neta. Per aquesta raó hem preferit parlar de producció de nitrogen mineral i no de taxa de mineralització

sembla ser un factor que afecti a la concentració de nitrogen mineral ($p=0,5473$). Aquesta anàlisi ens permet també demostrar que hi ha diferències entre els tipus de fang ($p=0,0303$). El fet que no resulti significativa la interacció sòl x fang en els primers quatre mesos, ens està indicant que el nitrogen mineral independentment del fang aplicat segueix el mateix patró temporal en els dos sòls. És interessant destacar, però, que el temps i la resta d'interaccions si resulten ser significatives (temps: $p=0,0017$; temps x sòl: $p=0,0002$; temps x tipus de fang: $p=0,0017$). Entre el cinquè i 7è mostreig (categoria temps 5-7), l'ANOVA de mesures repetides continua demostrant que hi ha diferències en funció del tipus de fang ($p=0,0099$), i que igual com s'observava en els primers mesos, el sòl i la interacció sòl x fang no resulten significatius ($p=0,0922$ i $p=0,0576$ respectivament). No obstant, si que hi ha un clar efecte del temps ($p<0,0001$) i de la interacció temps x fang ($p=0,0282$). Tot i tractar-se de mostres successius on la concentració de N mineral al sòl a temps (x_i) no és independent a la concentració a temps (x_{i-1}), per tal de comprendre el significat d'aquestes interaccions, serà interessant estudiar en cada mostreig les diferències en base als dos factors principals (sòl i tipus de fang).

L'anàlisi de la variància a cada un dels mostres (taula 4.2) ens ha permès estudiar la dinàmica del nitrogen mineral dels sòls esmenats en funció dels dos factors (sòl i tipus de fang) i la seva interacció (sòl x fang).

Taula 4.2. Nitrogen mineral ($N-NH_4 + N-NO_3$ m Kg^{-1}) en els sòls de la Vallmitjana (G) i el Puig (M) en els diferents mostres al llarg del període estudiat.

factor		mostreig																	
		1 (t=0 set)		2 (t=2 set)		3 (t=4 set)		4 (t=8 set)		5 (t=17 set)		6 (t=34 set)		7 (t=61 set)					
Sòl	G	24,2 ±9,9	b	28,5 ±11,2	a	28,8 ±12,8	a	***	41,8 ±25,7	b	28,8 ±14,4	a	12,7 ±13,5	a	4,2 ±4,1	b			
	M	16,2 ±8,7	a	43,7 ±18,8	b	55,7 ±26,3	b		17,7 ±10,6	a	ns	22,4 ±10,8	a	ns	8,9 ±3,9	a	0,5 ±0,7	a	
Fang	C	22,4 ±12,3	ab	21,4 ±12,9	a	20,2 ±8,7	a	***	21,4 ±10,3	a	19,2 ±8,3	a	6,12 ±2,1	a	3,9 ±5,6	a			
	F	14,7 ±7,8	a	43,1 ±13,3	b	55,4 ±21,5	b		54,3 ±29,5	b	**	38,9 ±8,3	b	**	21,42 ±15,4	b	ns	1,7 ±1,6	a
	T	26,6 ±6,6	b	38,4 ±7,1	b	34,0 ±14,2	c		24,2 ±14,4	a		20,4 ±7,3	a		7,4 ±3,2	a		2,5 ±2,3	a
sòlxfang		*		ns		*		**			ns		ns		ns				

S'ha fet l'ANOVA d'un factor a dos nivells (sòl i fang) per tal de detectar les diferències en la mineralització del N dels sòls esmenats. Les lletres indiquen quan hi ha diferències significatives (* $p<0,05$, ** $p<0,01$; *** $p<0,001$, ns = no significatiu; N=5 i N=3 al sòls de la Vallmitjana i el Puig respectivament).

Al moment de l'aplicació dels fangs (t=0) s'observa com en els sòls esmenats de textura arenosa (La Vallmitjana) la mineralització del nitrogen incrementa en comparació a la dels

sòls de textura franca (el Puig) (Figura 4.6). Aquest efecte, però, desapareix a partir de la segona setmana quan s'observa com als sòls de textura franca (el Puig) la mineralització del nitrogen és de l'ordre d'un 34 % més alta. Podem dir, per tant, que el nitrogen es mineralitza més ràpidament als sòls de textura franca (el Puig). A la vuitena setmana es reverteix la situació i, la mineralització del nitrogen en els sòls de textura arenosa passa a ser de l'ordre d'un 50 % més alta. S'ha de dir, però, que aquest increment es produeix únicament a les parcel·les que han rebut fang fresc. A partir d'aquest moment ja no s'observen diferències entre els dos sòls, tret d'una lleugera diferència al cap d'un any, on sembla ser que als sòls de textura arenosa encara es produeix una mica de mineralització.

Pel que fa als fangs, en el moment de l'aplicació, els sòls que han rebut fang d'assecatge tèrmic i compostat presenten majors nivells de nitrogen mineral que els sòls amb fang fresc. Es interessant observar el diferent comportament de cada tipus de fangs. En primer lloc, veiem com en els sòls amb fang compostat el nitrogen mineral s'estabilitza immediatament després de l'aplicació, presentant aproximadament els mateixos nivells durant els 5 primers mostrejos (17 setmanes). Per contra, el nitrogen aportat pels fangs fresc i assecat es continua mineralitzant. A la quarta setmana, moment en que s'estabilitza la mineralització del nitrogen aportat pel fang assecat, els sòls amb fang fresc presenten la concentració de nitrogen mineral major, mantenint-se aquesta diferència fins a la 34ena setmana. Al cap d'un any (7è mostreig) han desaparegut totes les diferències que hi havia entre els sòls esmenats.

Les interaccions ens indiquen quan hi ha diferències atenent-nos a la combinació entre els diferents sòls i fangs. En aquest cas és interessant observar el comportament dels fangs en cada sòl per separat, donat que hi ha lleugeres i significatives diferències (taula 4.2). Als sòls de textura franca (el Puig), tant el fang fresc com l'assecat, experimenten un increment de la concentració de nitrogen mineral en el temps, fins arribar al seu màxim, coincidint en ambdós casos en el tercer mostreig (finals de maig). Entre el quart mostreig (finals de juny) i cinquè mostreig (setembre) hi ha de nou un lleuger increment i a partir del mes de novembre comença a disminuir fins arribar a desaparèixer al cap d'un any, al mes de maig del 2002. El comportament dels fangs en els sòls de textura arenosa (La Vallmitjana) és completament diferent. Si bé s'observa al Puig una clara variació temporal en els sòls esmenats amb fang assecat, en aquest cas no hi ha un increment en la concentració de nitrogen mineral, ans al contrari, des del moment de l'aplicació fins al cinquè mostreig (setembre) presenta nivells estables. A partir de setembre observem, igual com passava en el sòls de textura franca (el Puig), una disminució progressiva dels nivells de nitrogen mineral fins arribar a desaparèixer, també, un any després de l'aplicació.

La ràpida mineralització que té lloc en els sòls de textura franca (el Puig) es produeix en plena primavera, al maig, i coincideix amb el mes més plujós (62 mm) (figures 4.2, 4.9) i amb una temperatura mitjana del sòl de 17 °C (figura 4.4). A diferència, en els sòls de textura arenosa (La Vallmitjana), tot i compartir les mateixes condicions ambientals, la mineralització és més lenta. A mesura que ens apropem al mes de juny, quan comença l'eixut estival, amb una temperatura ambient mitjana de 21 °C i màximes de 36°C, i una temperatura mitjana del sòl a 10 cm de 26,5 °C, amb màxims diürns de 38,5 °C (figura 4.6), observem un intens descens de la concentració del nitrogen mineral. A més, les fortes pluges del mes de juliol, concentrades en dos dies (Ojeda, *et al.*, 2003), poden haver provocat el rentat de part del nitrogen mineral produït en excés, sobretot en sòls de textura arenosa (La Vallmitjana).

4.5 DISCUSSIÓ

Tot i haver fet una aplicació superficial i, en una dosi més aviat baixa ($10 \text{ Mg fang m.s ha}^{-1}$) en comparació a les quantitats aportades habitualment en treballs de restauració de sòls, l'aportació d'un residu orgànic, com ara els fangs de depuradora, amb un alt contingut en nitrogen, provoca un immediat i significatiu increment en la quantitat de nitrogen total del sòl. El fet que els tres tipus de fangs emprats en aquest experiment provenguin de la mateixa partida, és a dir, que originàriament son idèntics, ens fa pensar a priori que la quantitat de nitrogen total dels sòls esmenats, hauria de ser la mateixa. A la introducció s'havia explicat com els processos de tractament dels fangs provoquen canvis en les formes de nitrogen, especialment durant el compostatge. El seguiment durant un any de les concentracions de nitrogen total i del nitrogen mineral dels sòls esmenats ens ha permès observar els efectes que tenen els diferents tipus de fang en la mineralització del nitrogen en un període de temps mitjà (13 mesos). D'entrada, el nitrogen que contenen els fangs està majoritàriament en forma orgànica, però, com ja s'ha comentat, els post-tractaments poden haver ocasionat canvis en la seva forma química, com a resultat d'una estabilització o no de la matèria orgànica (Smith, 1997 ; Werther, 1997). Les diferents propietats dels sòls estudiats, un sòl de textura arenosa, format sobre gresos (*Oxyaquic Haplustalf*) i l'altre de textura franca, format sobre margues (*Udic Calcustept*), i les variables ambientals, principalment temperatura i humitat del sòl, seran determinants per tal de comprendre la dinàmica temporal del nitrogen, ja que exerceixen un paper molt important en la seva mineralització. Per altra banda, les dades de precipitació seran molt útils per explicar les possibles causes de la disminució brusca de la concentració de les formes de nitrogen inorgàniques, associades principalment al rentat, bé sigui per escolament superficial o per lixiviació.

4.5.1 NITROGEN TOTAL

L'increment immediat en els nivells de nitrogen total, d'un 46-53 %, que es produeix en els sòls esmenats respecte els controls, tenint en compte que el contingut mitjà de nitrogen dels fangs era aproximadament del 4,2% ($N_{\text{fangs}} = 41,6 \pm 6,9 \text{ g Kg}^{-1}$), ens indica que principalment el nitrogen detectat ha estat aportat pels fangs. Conseqüentment, i tenint en compte que tots els fangs presenten un contingut de nitrogen similar, a l'inici no

s'observen diferències en funció del tipus de fang aplicat ($p=0,3143$). El motiu pel qual, tot i haver aplicat la mateixa quantitat de fang als dos sòls, els continguts de nitrogen total a l'inici són més elevats a les parcel·les de textura franca (el Puig) ($p=0,0054$), es deu a que els sòls del Puig tenien una concentració de nitrogen total major, d'uns $0,1 \text{ g kg}^{-1}$, davant dels $0,06 \text{ g kg}^{-1}$ dels sòls de la Vallmitjana, fet que representa prop d'un 45% més de nitrogen abans de l'adobat. Aquesta diferència és induïda, probablement, per la diferent granulometria dels dos sòls. Així, els sòls del Puig, amb una proporció molt gran de partícules minerals fines (més d'un 65% de llims i argiles) i de carbonats, facilitarien la formació d'agregats estables que protegeixen físicament la matèria orgànica del sòl, en redueixen la mineralització i, en conseqüència, presentarien uns continguts de nitrogen total clarament més elevats. Amb el temps s'observa una disminució progressiva del contingut de nitrogen total, molt intensa en les primeres setmanes. Aquesta vindria ocasionada principalment per les pèrdues d'amoni per volatilització, de nitrats per lixiviació o a processos de desnitrificació (Hernández *et al.*, 2001).

Al estudiar les diferències en el quocient C/N, observem d'entrada que en els sòls de textura franca sempre es manté per sota al dels sòls de textura arenosa. Cal tenir en compte que a la Vallmitjana, l'aplicació dels fangs ha estat precedida de la disposició de les restes de virosta triturada, que presenten una relació C/N molt elevada ja que es tracta de fragments de *Erica scoparia*, *Cistus saviifolius*, i branques de roures i alzines principalment, de manera que en els sòls de la Vallmitjana queda esmorteït l'efecte dels fangs i, per tant, la relació C/N, resulta molt superior a la dels sòls del Puig. Els sòls esmenats, però, sobretot en els primers mesos des de l'aplicació, presenten una relació C/N inferior als respectius controls, de manera que queda demostrada la eficiència d'aquests materials, és a dir, l'aplicació dels fangs suposa un enriquiment proporcionalment major en nitrogen que no pas en carboni, o millor dit, la relació C/N dels fangs és molt menor que la de la matèria orgànica del sòl i, per tant, en ser aplicats al sòl aquesta disminueix. Les diferències observades en funció del tipus de fang aplicat, amb una relació C/N menor en els sòls esmenats amb fang compostat i tèrmic que la dels sòls esmenats amb fang fresc, es poden explicar per una banda degut al procés de post-tractament del fang, on es produeix una estabilització de la matèria orgànica però, sobretot, degut a la mala incorporació del fang fresc al sòl, ja que en aplicar-lo va quedar distribuït per sobre de la superfície de manera molt heterogènia i clapejada, fins que es va anar esmicolant poc a poc, a diferència del tèrmic i del compost que van quedar millor repartits. És a dir, les mostres de sòl de les parcel·les amb fang fresc reflectien menys la influència del fang. D'acord amb els resultats obtinguts en les determinacions de les propietats físico-químiques sobre la mostra seca dels fangs (Projecte Ecofangs, 2003), els

productes aplicats no són massa estables, amb un grau d'estabilitat al voltant del 40% si bé, el post-tractament de compostatge incrementa lleugerament aquesta estabilitat.

4.5.2 NITROGEN AMONIAL

En la caracterització dels fangs (*Projecte Ecofangs, 2003*) s'observava que el contingut mitjà de nitrogen total era aproximadament d'un 4,2 %, i la concentració mitjana de nitrogen en forma amoniacal era del 0,43 % ($4,3 \text{ mg g}^{-1} \text{ m.s.}$). Això demostra que al voltant del 90 % del nitrogen al moment de l'aplicació es troba en forma orgànica. No obstant, aquest 10% de N-NH_4^+ que es detecta és una fracció no despreciable, com demostra l'increment que es produeix en la concentració al sòl d'aquesta forma inorgànica immediatament després de l'aplicació dels fangs. Tot i la gran diferència en la concentració de nitrogen amoniacal detectada en la caracterització dels materials (taula 4.1), l'aportació de qualsevol tipus de fang al sòl, representa un augment de la concentració de nitrogen amoniacal. Ara bé, s'ha observat que el fang sotmès a assecatge tèrmic incorpora, immediatament després de l'aplicació, major quantitat d'amoni al sòl que els altres fangs. D'acord amb Werther i Ogada (1997), en els fangs tractats a temperatures relativament elevades es produeix una alliberació parcial de l'amoni amb el vapor i, per tant, disminueix el seu contingut de nitrogen amoniacal. Altres anàlisi fetes pel projecte on s'emmarca aquesta tesi mostren com l'amoni disminueix de manera important durant el procés de tractament del fang per obtenir l'assecat tèrmic, ja que, l'amoniac es perd fàcilment per efecte de la temperatura (*Projecte Ecofangs, 2003*). No obstant, el valor trobat en les anàlisi del fang assecat del 2001 ($4,4 \pm 1,3 \text{ g NH}_4^+\text{Kg}^{-1} \text{ m.s.}$), no difereix al del fang fresc ($4,1 \pm 0,2 \text{ g NH}_4^+\text{Kg}^{-1} \text{ m.s.}$). En el cas de la mostra de fang de l'any 2001, l'increment en la concentració de N-amoni, s'atribueix a l'espai de temps (6 mesos) que ha passat entre la producció del fang i la seva caracterització, temps durant el qual es pot haver nitrificat o perdut per volatilització. Durant aquest temps, malgrat haver emmagatzemat la mostra de fang en un dipòsit de plàstic hermèticament tancat, degut a l'alta higroscopicitat del mateix, s'ha produït un cert augment de la humitat que podria haver afavorit una certa transformació de part del nitrogen orgànic a nitrogen amoniacal (*Projecte Ecofangs, 2003*). En condicions de camp, l'explicació per la qual la concentració d'amoni als sòls esmenats amb fang d'assecatge tèrmic l'inici són més elevats es deuria a que, abans de l'aplicació, el fang d'assecatge tèrmic va estar emmagatzemat uns dies en un cobert, on les condicions de temperatura i humitat haurien permès una certa mineralització i, per tant, en el moment de l'aplicació part del nitrogen orgànic s'hagués mineralitzat i hagués passat a forma amoniacal. En aquest sentit, al capítol 2 d'aquesta tesi ja s'ha pogut observar que els fangs assecats presenten una elevada taxa de mineralització que corroboraria aquesta hipòtesi. Pel que fa

als fangs frescs, els sòls esmenats amb aquest fang, tenen nivells baixos d'amoni i, amb el temps va incrementant, és a dir, s'ha observat que hi ha un retard en la amonificació. D'acord amb Hernández *et al.*, (2001), l'increment del N-amoniacal als sòls esmenats amb fang fresc es produeix més lentament que als altres tractaments i, per tant, esperarem que el pic màxim de concentració d'amoni en aquests sòls es produeixi més tard. La concentració inicial més baixa d'amoni en els sòls tractats amb fangs frescos en relació als compostats era d'esperar, ja que durant el procés de compostatge ja s'ha mineralitzat la fracció més làbil de la matèria orgànica nitrogenada. És a dir, que en els fangs compostats ja s'ha produït, parcialment la transformació de l'amoni. Pel que fa als fangs assecats, en el capítol 2 d'aquesta tesi ja s'ha demostrat que la seva mineralització és més ràpida que no pas la dels fangs frescos i, en conseqüència, també és més ràpida l'amonificació.

La mineralització del nitrogen dels sòls esmenats amb fangs de depuradora varia de manera important depenent del tipus de sòl (Lindeman i Cardenas, 1984; Chae i Tatabai, 1986). Inmediatament després de l'aplicació, als sòls de la Vallmitjana, la mineralització està afavorida i, per tant, al aplicar els fangs, el nitrogen que contenen es mineralitza més ràpidament. D'acord amb Hernández, *et al.*, (2001), el sòl sorrenc afavoreix més els processos de mineralització que el sòl argilós, ja que les partícules d'argila protegeixen la matèria orgànica front la mineralització (Stevenson, 1986). No és descartable, a més, que existeixi un efecte de major ventilació derivat de la major porositat dels sòls de textures més grolleres, que afavoriria, també, la mineralització de la matèria orgànica aportada.

Per contra, immediatament després de l'aplicació, en els sòls amb textura franca, la mineralització es produeix més lentament i, per aquesta raó a l'inici, la concentració d'amoni està molt per sota de la detectada a la Vallmitjana. No obstant en aquests sòls, a partir de la segona setmana, es produeix una intensa amonificació en tots els tractaments. Aquest increment s'ha d'atribuir a les condicions ambientals favorables, amb les pluges de primavera (62 mm pluja acumulada al mes de maig), i a la major capacitat de retenció d'aigua del sòl de textura franca (el Puig), que afavoriria la mineralització de la matèria orgànica del sòl (Hirose i Kumada, 1963). El petit increment que s'observa en els sòls control recolza aquesta idea, degut a la mineralització de la matèria orgànica del propi sòl. És possible que es produeixi, també, una lleugera amonificació de la matèria orgànica nitrogenada present als sòls abans de l'adobat com a conseqüència de la pertorbació mecànica que ha suposat el llaurat i el pas de maquinària. Referent als sòls esmenats amb fang compostat l'explicació la trobem en el nitrat, ja que part de l'amoni que aquests fangs contenen, en contacte amb l'aire, s'ha nitrificat i, conseqüentment, no s'observa una

amonificació neta, sent els nivells de N-amoni estables immediatament després de l'aplicació, i a partir de la segona setmana tendeixen a disminuir.

4.5.3 NITROGEN DE NITRAT

Al moment de l'aplicació en les parcel·les que han estat fertilitzades amb fang compostat, ja es detecten nitrats al sòl. El fet de tractar-se d'un residu orgànic més madur que els fangs tèrmics o frescos i, per tant, amb una matèria orgànica més estabilitzada, pot haver ocasionat que part del nitrogen orgànic s'hagués mineralitzat en el procés de compostatge i, per tant, en el moment d'aplicar el fang, aquest contingés certa quantitat de nitrats. Aquest efecte va lligat al procés de post-tractament de compostatge, ja que en la mineralització de la matèria orgànica hi ha una alliberació de N en forma amoniacal (Projecte Ecofangs, 2003). Durant el període de maduració d'aquest material, es pot produir l'oxidació de l'amoni amb l'acció dels bacteris nitrificants i generar nitrats. Aquest procés d'estabilització de la matèria orgànica nitrogenada queda també reflectit en els valors de la fracció de nitrogen més resistent, és a dir el nitrogen no hidrolitzable (*Nnh*), ja que augmenta en el procés de compostatge (Projecte Ecofangs, 2003).

Els altres fangs, atesa la seva producció en condicions anaeròbics, no contenen pràcticament nitrats en el moment de l'aplicació al sòl, i es van produint posteriorment, a mesura que es va mineralitzant la matèria orgànica nitrogenada fresca que contenen. A partir de la segona setmana, el patró que segueix la dinàmica del nitrat varia d'un sòl a l'altre. Aquesta variació va lligada a la producció d'amoni, ja que com hem vist anteriorment, a partir de la segona setmana es produïa el pic de N-amoni en els sòls de textura franca (El Puig). Per contra, en els sòls de textura arenosa, i amb l'excepció dels sòls esmenats amb fang fresc no s'observava un gran increment en la concentració d'amoni al sòl i, per tant, la producció de nitrats és previsible que sigui més gradual. En aquests sòls, hem vist com l'amoni incrementava al segon mostreig (2a setmana). Això explicaria el lleuger increment en la concentració de N-NO₃ que comença a manifestar-se a partir del primer mes (3er mostreig), sobretot en les parcel·les adobades amb els fangs frescs i assecats, i que assoleix el màxim dos mesos després de l'aplicació (4rt mostreig). El motiu pel qual, com ja apuntàvem, no s'observa un gran increment de nitrat en aquests sòls, es deu en part a aquesta producció més gradual i a que, durant les fortes pluges del mes de maig, part del nitrat es pot haver rentat fàcilment a través de l'epipedió sorrenc d'aquest sòl. El nitrat és altament mòbil en els sòls, així doncs, l'acumulació de nitrat estarà molt relacionada als esdeveniments de pluja (Terry, 1986). La valoració del nitrat que es perd per lixiviació és complicada a causa de les fluctuacions en la concentració del nitrat, degudes als factors biològics: (i) absorció de les plantes; (ii) immobilització; (iii)

mineralització; (iiii) desnitrificació (SAPG Working Group, 2000). Segons això, sabem que (i) una resposta positiva en el creixement de la vegetació és un bon indicador de l'absorció de nitrat, i resulta que la disminució detectada de nitrat al sòl, es produeix entre el tercer i el quart mostreig, indistintament en tots els tractaments, i coincideix amb l'època de màxim creixement de la vegetació (entre finals de maig i finals de juny). (ii) i (iii) una relació C/N menor de 20 afavoreix la mineralització i, per tant, en aquest cas esperarem que la immobilització sigui un factor poc important; (iiii) les pèrdues atmosfèriques de nitrogen en forma diatòmica (N_2) o en forma d'òxid (N_2O) requereix condicions anaeròbies o baixa disponibilitat d'oxigen (O_2 -limitant), i estan estretament correlacionades amb els nivells de carboni orgànic i, especialment, de carboni làbil del sòl (Saguer, 1997). En aquest cas, la dosi de fang aplicada no ha estat gaire elevada, el sòl està ben airejat, per tant, es previsible que la pèrdua per desnitrificació no sigui gaire alta.

Segons Gaines i Gaines (1994), un sòl amb quantitats significatives de llims, argila i matèria orgànica conservarà més el N- NO_3 que un sòl amb una proporció baixa d'aquests components, de manera que un sòl com el del Puig presenta una major retenció de N- NO_3 , que un sòl com el de la Vallmitjana. Tenint en compte que els sòls del Puig tenen textura franca, esperarem que la pèrdua per lixiviació sigui poc important. Per aquesta raó, després de l'estiu (cinquè mostreig) detectem, encara, un pic de nitrat. Aquest, però, es produeix únicament en els sòls esmenats amb fang fresc i tèrmic. En el cas dels sòls esmenats amb fang compostat, aquest increment no s'ha produït, ja que és un material més estabilitzat i el nitrogen orgànic, possiblement s'ha mineralitzat abans que en els altres tractaments. A diferència, en els sòls de textura arenosa amb gran proporció de sorres (sorres totals=86,3%), esperarem que el nitrat acumulat durant l'estiu, que no ha estat absorbit per les plantes, s'hagi perdut principalment per lixiviació.

4.5.4 NITROGEN MINERAL

La mineralització és la conversió d'un element que es troba en forma orgànica a un estat inorgànic com a resultat de la descomposició microbiana (Lutz, 1965), i succeeix mitjançant l'oxidació microbiana de la matèria orgànica del sòl (Terry, 1986). La producció d'amoni i de nitrats és, doncs, en el cas que ens ocupa, indicadora de la mineralització de la matèria orgànica nitrogenada dels fangs. Els sòls esmenats pateixen una immediata resposta en el contingut de nitrogen mineral, com a conseqüència de l'aportació amb els fangs d'una matèria orgànica amb un alt contingut de nitrogen orgànic susceptible a ser mineralitzat. Les formes minerals de nitrogen experimenten en funció del material parental on s'han desenvolupat els sòls, una diferent dinàmica. És interessant, però, destacar com aquesta marcada variació temporal es produeix de manera gairebé idèntica per als diferents fangs.

La gran dependència de la mineralització a les condicions ambientals, tal i com ja s'ha comentat en altres apartats, provoca aquest patró temporal. Segons Hsieh *et al.*, (1981), quan la temperatura passa de 8 a 22 °C, la taxa de mineralització en sòls esmenats amb fangs incrementa aproximadament el doble. Els tretze mesos de durada de l'experiment han estat suficients per observar l'efecte que provoca al sòl el nitrogen aportat pels diferents tipus de fangs EDAR estudiats. Recordem que els fangs tenen el mateix origen i, per tant, les diferències que s'han observat en la mineralització d'aquest nutrient són degudes a les transformacions, que ha experimentat el material originari durant els processos de tractament, i que han modificat o alterat la seva naturalesa. Immediatament després de l'aplicació dels fangs, el contingut de nitrogen inorgànic als sòls esmenats amb fang d'assecatge tèrmic és superior als sòls esmenats amb fang compostat i fang fresc. Com ja hem vist en la discussió, l'amoni generat abans de l'aplicació és el responsable que, a la setmana de l'aplicació, hi hagi major concentració de nitrogen mineral en els sòls on s'hi ha aplicat fang tèrmic i fang compostat. En els sòls on s'hi ha aplicat fang compostat, s'observa que la concentració de nitrogen mineral es manté a nivells gairebé estables, amb valors mitjans de $20 \text{ mg Kg}^{-1} \text{ N-NH}_4 + \text{N-NO}_3$, fins a la 17a setmana, quan comença a disminuir. Segons la EPA (1995) el fang compostat es mineralitza molt més lentament que el fang fresc bé sigui digerit de forma aeròbica o anaeròbica. Això justificaria que la concentració de nitrogen mineral als sòls esmenats amb fang compostat sigui inferior, almenys a la dels sòls que han rebut fang fresc. Pel que fa al fang assecat, en el primer mes hi ha una forta mineralització del nitrogen, però immediatament s'estabilitza. S'ha vist també, que el sòl és un factor que determina la dinàmica del nitrogen, i que aquesta no és independent del tipus de fang (sòl*fang: $p < 0,05$), sobretot pels sòls esmenats amb fangs assecats i frescs. Als sòls de textura franca (el Puig), es produeix un increment en el temps de la concentració de nitrogen mineral, tant en els sòls esmenats amb fang fresc com assecat, sempre inferior, però, en aquest darrer cas, i en ambdós casos arribaven al valor màxim un mes després de l'aplicació (finals de maig). La davallada que es produeix durant el mes de juny, l'hem d'atribuir, si més no parcialment, a l'absorció de les plantes, donat que coincideix amb l'estadi de creixement de la vegetació i, a mesura que ens apropem a l'estiu, a la disminució de l'activitat microbiana per l'eixut estival. Al mes de setembre (17a setmana), hi ha de nou un lleuger increment ja que, passat l'eixut de l'estiu, els microorganismes heterotròfics del sòl reprenen la seva activitat. A partir del mes de novembre (34a setmana) s'observa com el nitrogen mineral ha començat a disminuir fins arribar a desaparèixer pràcticament un any després de l'aplicació. Per contra, a la Vallmitjana, donades les característiques físiques del sòl, amb gran proporció de sorres en superfície, les parcel·les que han rebut fang assecat, que com

hem vist al moment de l'aplicació ja tenien quantitats importants de n-nitrat, han sofert una important pèrdua de nitrogen mineral. Analitzades les possibles causes de pèrdua de nitrogen i donada la coincidència entre les propietats del sòl i un període de pluges important (primavera 2001), hem de pensar que part del nitrogen s'hagi lixiviat. El fet que el fang fresc, com ja ha hem vist anteriorment, vagi alliberant el nitrogen més lentament, evitaria el primer període de pluges (maig 2001) i, per tant, als dos mesos de l'aplicació del fang (finals de juny 2001) s'observa que ha incrementat la concentració de nitrogen mineral al sòl. A partir de setembre, observem igual com passava en el sòls de textura franca (el Puig) una disminució progressiva dels nivells de nitrogen mineral fins arribar a desaparèixer, també, un any després de l'aplicació.

4.5.5 EL PROBLEMA DELS NITRATS

Els resultats obtinguts i discutits en aquest apartat no permeten determinar una taxa de mineralització de la matèria orgànica nitrogenada, que com ja s'ha comentat en més d'una ocasió en aquesta tesi, és un dels principals problemes derivats d'aquestes pràctiques de fertilització. No obstant, pensem que seria interessant intentar respondre la pregunta: *amb la dosi en què han estat aplicats els diferents tipus de fangs, la producció de nitrats que se'n deriva pot representar algun tipus de problema ambiental?*

En els paràgrafs precedents hem pogut veure que el nitrat presenta una gran variació temporal, lligada als factors ambientals i al tipus de sòl, però, el més interessant, ha estat la constatació que la mineralització del nitrogen aportat pels diferents fangs i, per tant, la producció de nitrats, varia d'un tipus a l'altre. La qüestió és de quina manera, amb les dades disponibles, podem expressar la producció de nitrats en una unitat que sigui comparable i, per tant, indicativa de la seva magnitud al sòl.

La manca d'informació sobre la pèrdua per lixiviació és un gran *handicap*, no obstant, en tots els casos s'ha detectat en algun moment un pic de concentració de nitrat al sòl. Evidentment, aquest pic és puntual i varia molt en funció del tipus de sòl i de fang amb què ha estat fertilitzat. De totes maneres, aquest pic de concentració es podria comparar al que es produeix al sòl quan el nitrogen s'aplica en forma de fertilitzant mineral ràpid, és a dir, una aportació important i sobtada de nitrats al sòl.

Partint de la concentració màxima de nitrats detectada en cada parcel·la que ha rebut fang, i coneixent la proporció de terra fina i la densitat aparent del sòl (capítol 3), i tenint en compte que la profunditat de mostreig era de 20cm, podem transformar el valor de concentració en Kg ha^{-1} , aplicant la següent funció:

$$A \frac{mgN-NO_3}{kg_{terrafina}} \frac{1kgN-NO_3}{10^6 mgN-NO_3} \frac{Bkg_{terrafina}}{100kg_{sòl}} \frac{Ckg_{sòl}}{1m^3} \frac{2000m^3}{1ha} = \quad (1)$$

$$A \cdot B \cdot C \cdot 2 \cdot 10^{-5} kgN/ha$$

On: A és la concentració de N-NO3 (en mg kg⁻¹);

B és la proporció de terra fina (en %); i

C és la densitat aparent (en kg m⁻³)

A la taula 4.3 es mostren els valors mitjans de la concentració màxima de nitrats al sòl de les diferents parcel·les experimentals, i la concentració de nitrat estimada a partir de la transformació (1), en kg N ha⁻¹.

Taula 4.3. Concentració màxima mitjana detectada al sòl, percentatge en terra fina, densitat aparent i concentració estimada expressada en Kg N-NO3 ha⁻¹.

Localitat	tipus de fang	Pic de Concentració N-NO3 mg Kg ⁻¹	Terra fina %	Da Kg m ⁻³	Concentració de N-NO3 (estimada) Kg ha ⁻¹
La Vallmitjana	Compostat	17,7	59,8	1410	29,8
	Fresc	27,9			47,1
	tèrmic	16,8			28,4
El Puig	Compostat	25,4	93,2	1170	55,4
	Fresc	72,3			157,6
	tèrmic	58,6			127,7

Els valors obtinguts, per suposat són només indicatius, ja que en aplicar un fertilitzant mineral es produeix un pic de concentració de nitrat i immediatament comença a disminuir, al no haver-hi més producció. A diferència, en el cas dels fangs, el pic de nitrats va precedir i seguit d'una producció més o menys extensa en el temps, com a resultat de la mineralització del nitrogen en forma orgànica que contenen.

Per començar, diferenciarem els dos tipus de sòl, ja que, com ja hem vist en la discussió quan tractàvem el nitrat, la pèrdua per lixiviació en els sòls de textura arenosa (La Vallmitjana) a través de l'epipedió sorrenc pot ser important i, per tant, no s'arriba a detectar un pic de concentració extremadament alt. Per contra, en els sòls de textura franca (El Puig), hem vist que la lixiviació és petita, de manera que l'acumulació de nitrat al sòl és més elevada. El fet d'observar un pic de concentració sobtat, que passa pràcticament de 0-9 mg Kg⁻¹ N-NO₃⁻ en el moment de l'aplicació (fang fresc=1,59; fang compostat=8,13; fang assecat=1,83) al valor màxim (taula 4.3), en tan sòls un mes des de

l'aplicació, pot significar que s'apropa bastant al valor real de nitrats que es produeix en cada cas. Segons això, estem parlant d'una acumulació neta de nitrats de l'ordre de 55,4 Kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ en els sòls adobats amb fang compostat, 157,6 Kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ en els sòls que han rebut fang fresc i 127,7 Kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ en els sòls amb fang assecat. La directiva Europea sobre nitrats (EU Nitrates Directive: 91/676/EEC) limita l'aportació anual de nitrogen en fertilitzants minerals o orgànics a 170 Kg N ha⁻¹ en àrees amb aquífers vulnerables.

Tenint en compte que en els diferents tractaments es van aplicar 10,1 Mg de fang fresc (sms) ha⁻¹, 13,5 Mg de fang compostat (sms) ha⁻¹ i 12,8 Mg de fang assecat (sms) ha⁻¹ i que el nitrogen dels fangs en el moment de l'aplicació està pràcticament tot en forma orgànica, aquests valors revelen l'efecte que aquests residus orgànics poden causar en la producció de nitrats, sent molt més accentuat en els sòls que han rebut fang fresc, seguit dels fangs assecats i finalment i molt per sota el fang compostat. Una dada important, és el criteri emprat per calcular la dosi de fang, que en aquest cas corresponia a aplicar una dosi equivalent a 6 Mg de matèria orgànica fresca ha⁻¹ (veure capítol 3). Tornant al valor de la producció de nitrats estimada a partir de l'equació (1), no hi ha gaire diferència en la concentració al sòl de les parcel·les esmenades amb fang fresc i fang assecat.

Podem intentar, arribats a aquest punt, d'establir si no un balanç del nitrogen aportat pels fangs, sí unes línies generals de les principals transformacions que la matèria orgànica nitrogenada ha experimentat en els sòls objecte d'estudi. Amb les dades a disposició, és possible calcular la quantitat de nitrogen aportada al sòl a l'inici de l'experiment. Per altra banda, les dades de producció vegetal (capítol 5) ens han permès d'estimar les extraccions de nitrogen per part de la vegetació, tot utilitzant dades mitjanes de concentracions de N en prats de gramínies. La quantitat residual (romanent) de N al sòl, provinent de l'aportat amb els fangs, s'ha estimat a partir de les anàlisis del nitrogen Kjeldahl al final de l'experiment. Així, per a cada parcel·la s'ha calculat aquest N residual tot restant de la seva concentració de N Kjeldahl el N analitzat al seu respectiu sòl de control, també al final de l'any de seguiment. La quantitat de fangs aportada inicialment s'ha dividit, doncs, en dos grans fluxos: el N extret per la producció vegetal i el N que ha quedat al sòl en forma residual. La resta del N aportat s'ha considerat, en aquest cas, com a sortides del sistema. Aquestes sortides poden correspondre a pèrdues per lixiviació, volatilització o desnitrificació, però també a un transport del N més enllà dels 20 cm de fondària en el qual s'ha desenvolupat aquest estudi. En aquest sentit, cal esmentar que diversos treballs han demostrat que sòls llaurats tractats amb diferents tipus de residus orgànics poden presentar pèrdues de N per volatilització de fins a un 20% de la quantitat total de N

aportada en períodes de pocs mesos (Pain i Thompson, 1989; Van der Molen *et al.*, 1989) i que les pèrdues per desnitrificació poden arribar a superar el 50% del nitrogen aportat en sòls irrigats amb mal drenatge (Goulding i Webster, 1989; Maag, 1989)

Els resultats d'aquest càlcul es presenten a la figura 4.7. Destaca el fet que les extraccions per la coberta vegetal són molt similars en totes les parcel·les estudiades, i sempre de l'ordre dels 200-250 kg N ha⁻¹ en 1 any. En aquest sentit, però, cal tenir en compte que en el cas de les parcel·les del Puig no es va desenvolupar massa la primera collita de l'any (primera primavera), a causa d'un retard en la sembra. En cas que s'hagués produït aquesta collita, de ben segur que les extraccions per la coberta vegetal haurien estat força majors que a la Vallmitjana. Per altra banda, cal tenir en compte que en el cas de les parcel·les de la Vallmitjana no s'ha considerat l'extracció de N per part dels arbres, malgrat que, com es veurà al capítol 5, han experimentat un important creixement.

Les pèrdues estimades de N dels primers 20 cm del sòl han estat, per a tots els fangs, menors en el cas de la Vallmitjana que en el cas del Puig. Aquest resultat resulta sorprenent, ja que a priori s'esperava que es produïrien més pèrdues de N a la Vallmitjana, a causa de l'epipedió sorrenc que en facilita la lixiviació. Diferents elements poden ajudar, però, a interpretar aquests resultats: i) els sòls del Puig han presentat una mineralització més ràpida de la matèria orgànica (capítol 3), i especialment la fracció nitrogenada, com ja ha estat demostrat en aquest capítol; ii) els sòls del Puig, pel seu pH bàsic, poden experimentar unes majors pèrdues de N per volatilització

Probablement, la menor i més lenta mineralització de la matèria orgànica nitrogenada als sòls de la Vallmitjana sigui un element de gran importància en la quantitat de N que es perd del sistema, ja que per aquests sòls s'ha observat que el N residual que queda al cap d'un any de l'aplicació dels fangs és força més gran que no pas per als sòls del Puig. Cal remarcar, de totes maneres, que el fet d'incorporar una quantitat de nitrogen al sòl superior a les necessitats de la coberta vegetal no es tradueix en un increment de la reserva nitrogenada. Així, en totes les parcel·les estudiades es pot veure que la quantitat de nitrogen residual al cap d'un any de l'aplicació és força baix, en comparació amb la quantitat total aplicada. Una excepció a aquesta observació és el sòl tractat amb el fang compostat, que presenta una menor mineralització i, a més, ha estat incorporat en una proporció similar a les extraccions per la vegetació. En aquest cas, en ser menor la seva taxa de mineralització, la matèria orgànica nitrogenada pot quedar efectivament emmagatzemada al sòl.

Amb totes les limitacions que té, ja que aquest no era l'objectiu del treball, el balanç de nitrogen presentat, ens fa pensar que de cara a la utilització dels fangs de depuradora com

a subministradors de nitrogen, cal tenir en compte la diferent velocitat de mineralització de cada tipus de residu, però també l'important paper que juguen les característiques del sòl receptor.

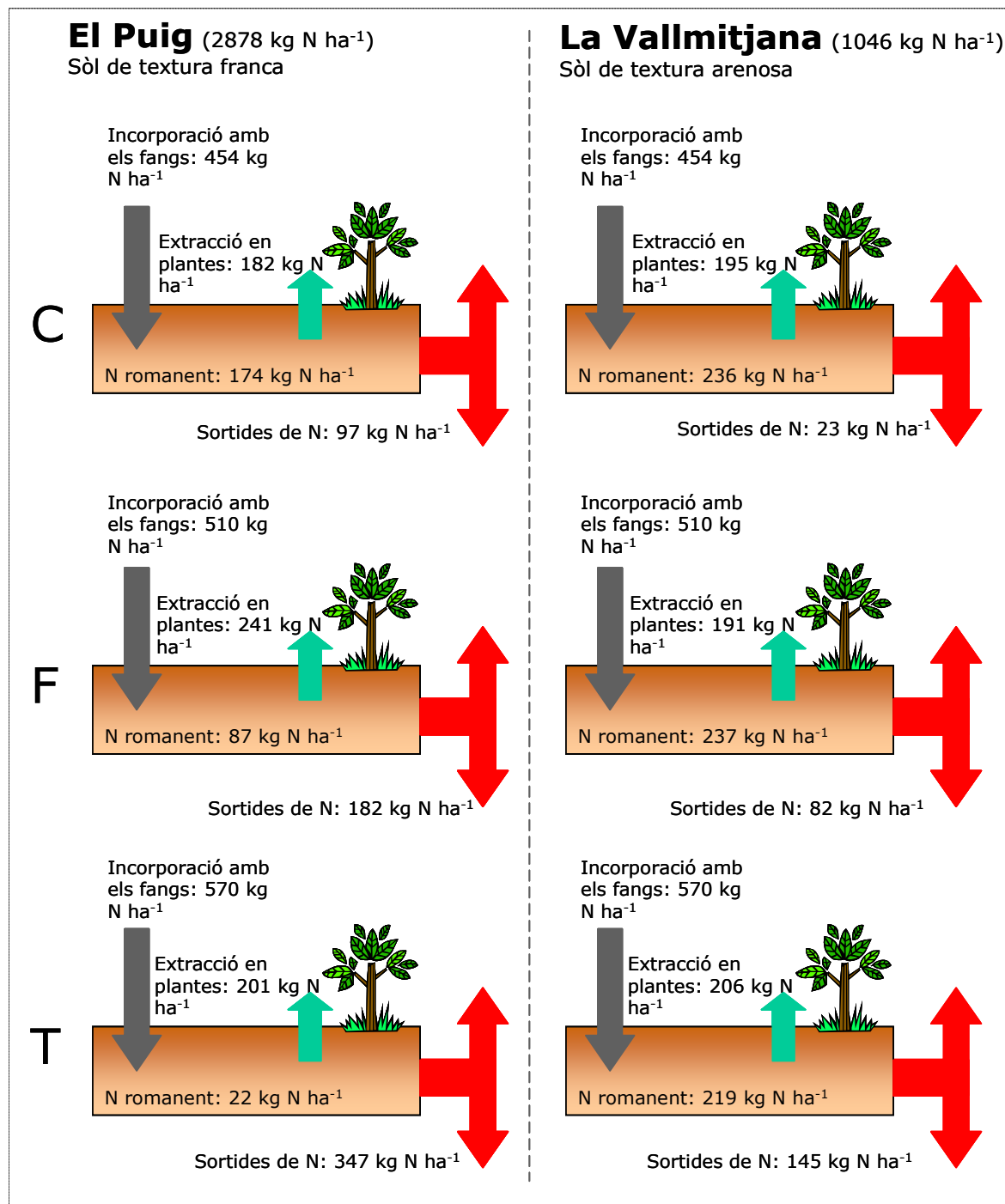


Figura 4.7. Elements per a un balanç del N a les diferents parcel·les estudiades.

S'indica, per a cada localitat, el contingut de N total de la zona. Per a cada parcel·la s'han recollit les dades d'aportació de N amb els fangs, extraccions per la vegetació, nitrogen romanent de l'aplicat amb els fangs, i les pèrdues del sistema.

4.6 CONCLUSIONS

L'aportació d'un residu orgànic, com ara els fangs de depuradora, amb un alt contingut en nitrogen, provoca un immediat i significatiu increment en la quantitat de nitrogen total del sòl.

La relació C/N dels fangs és molt menor que la de la matèria orgànica del sòl i, per tant, en ser aplicats al sòl aquesta disminueix, de manera que, tots els sòls esmenats presenten una relació C/N inferior als respectius controls. Els sòls esmenats amb fang compostat i assecat tenen una relació C/N inicial, sempre inferior a la dels sòls esmenats amb fang fresc, a causa d'una incorporació més heterogènia dels fangs frescos.

El nitrogen aportat pels fangs es troba pràcticament en forma orgànica (89%). No obstant, l'11% restant està en forma inorgànica, principalment amoniacal i, per tant, immediatament després de l'aplicació es produeix un augment en la concentració de nitrogen amoniacal. Les diferències entre els tipus de fangs són degudes al procés de post-tractament i a les condicions d'emmagatzematge, durant els quals es pot produir una mineralització parcial de la matèria orgànica nitrogenada que contenen.

La mineralització del nitrogen dels sòls esmenats amb fangs de depuradora varia de manera important depenent del tipus de sòl i, donada la seva gran dependència a les condicions ambientals, presenta una marcada variació temporal. El procés de post-tractament provoca canvis en les propietats químiques dels fangs que influeixen en la mineralització del nitrogen orgànic, sent més ràpida en els fangs assecats.

La producció de nitrats estimada és proporcionalment superior en aquelles parcel·les on s'hi ha aplicat fang assecat, seguit del fang fresc i, molt per sota, el compostat.

Caldria orientar els estudis de manera que és pogués arribar a establir un balanç del nitrogen aportat, la fracció absorbida per la coberta vegetal i, especialment, les pèrdues per lixiviació i volatilització.

L'aplicació superficial de fangs en zones forestals, atesa la seva ràpida mineralització, pot generar problemes de pèrdues de nitrogen per lixiviació. Per tant serà molt important ajustar (limitar) les dosis cas que es realitzin aquestes pràctiques de forma extensa ja que el nitrogen no queda gaire estabilitzat en el sòl, fet que obligaria a repetir les aplicacions en anys successius.

4.7 REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Anderson, H.A.; W. Bick, A. Hepburn, M. Stewart .1989 Nitrogen in humic substances, p: 223 – 256. In: Hayes, M.; P. McCarthy, R. Malcom, R. Swift, Humic Substances II: I Search of Structure. Ed. J. Wiley, Chichester, 764 p.
- Baasing, D. 2003. Controlling nitrogen losses - can we learn from the European experience?. Proceedings of the 11th Australian Agronomy Conference, Geelong, 2003. <http://www.regional.org.au/au/asa/2003/c/8/blaesing.htm>
- Banerjee, M.R.; Burton, D.L. & Depoe, S. 1997. Impact of sewage sludge application on soil biological characteristics. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 66: 241-249.
- Bernal, M.P.; Sánchez-Monedero, M. A.; Paredes, C. & Roig, A. 1998. Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 69, Issue 3, 6 July 1998, Pages 175-189
- Boyle, M. 1990. Biodegradation of land-applied sludge. *J. Environ. Qual.* 19: 649-644
- Breland, T. A. 1994. Measured and predicted mineralization and denitrification as a result of heterogenous distribution of clover residues in soil. *Plant and Soil.* 166: 1-12
- Broadbent, F.E. 1986. Effects of organic matter on nitrogen and phosphorus supply to plants. In Chen, Y. & Avnimelech, Y. 1986. The role of organic matter in modern agriculture. Chapter 2. Martinus Nijhoff publishers. Dodrecht/Boston/Lancaster.
- Chae, Y.M. & Tatabai, M.A. 1986. Mineralization of nitrogen in soils amended from sewage sludge compost. *J. Environ. Qual.* 7: 217- 221.
- EPA, 1995. Process design manual: surface disposal of sewage sludge and domestic septage. EPA/625/R-95/OOI, U.S. Envir. Protection Agency, Ofc. of Research and Development, Washington D.C.
- Goulding, K. W. T. & Webster, C. P. 1989. Denitrification losses of Nitrogen from arable soils as affected by old and new organic matter from leys and farmyard manure. In : Hansen, J. A. & Henriksen, K (eds) Nitrogen in organic wastes applied to soils. Academic Press. San Diego, CA.
- Hernandez, T.; Moral, R.; Perez-Espinosa, A.; Moreno-Caselles, J.; Perez-Murciab, M.D. & Garcia, C. 2001. Nitrogen mineralisation potential in calcareous soils amended with sewage sludge. *Bioresource Technology* 83 (2002) 213–219
- Hsieh, Y. P., Douglas, L. A. & Motto, L. H. 1981. Modeling Sewage Sludge Decomposition in Soil: I. Organic Carbon Transformation. *Journal of Environmental Quality* 10:54-59.
- Hiroji, S. & Kumada, K. 1963. Mineralisation of native organic nitrogen. *J. Soil. Sci. Tokyo.* 34: 339-344. In Chen, Y. & Avnimelech, Y. 1986. The role of organic matter in modern agriculture. Chapter 2. Martinus Nijhoff publishers. Dodrecht/Boston/Lancaster.
- Jensen, L.S.; Mueller, T.; Magid, J. & Nielsen, N.E. 1997. Temporal variation of C and N mineralization, Microbial biomass and extractable organic pools in soil after oilseed rape straw incorporation in the field. *Soil Biol. Biochem.* 7: 1043-1055.
- Lindeman, W.C & Cardenas, M. 1984. Nitrogen mineralization potential and nitrogen transformations of sludge-amended soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1072-1077.

- Lutz, J. F., 1965. "Glossary of Soil Science Terms." Soil Science Society of America Proceedings 29:330-51. In Kelley, W.D.; Martens, D.C.; Reneau Jr, R.B& Simpson, T.W. 1984. Agricultural Use of Sewage Sludge: A Literature Review. www.vwrrc.vt.edu/publications/B%20143.pdf
- Maag, M. 1989. Denitrification losses from soil receiving pig slurry or fertilizer. In : Hansen, J. A. & Henriksen, K (eds) Nitrogen in organic wastes applied to soils. Academic Press. San Diego, CA.
- Myers, R.J.K.; Campbell, C.A. & Weir, K.L. 1982. Quantitative relationship between net nitrogen mineralization and moisture content of soils. Can. J. Soil Sci. 62:111-124. In Chen, Y. & Avnimelech, Y. 1986. The role of organic matter in modern agriculture. Martinus Nijhoff publishers. Dodrecht/Boston/Lancaster.
- Ojeda, G. 2002. Evaluación de la escorrentía y las pérdidas por erosión en dos suelos fertilizados con tres tipos de lodos de depuradora en condiciones de campo. Treball experimental de tercer cicle. Bellaterra. Bcn
- Ojeda, G.; Alcañiz, J.M. & Ortiz, O. 2003. Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge. Land Degradation & Development. 14: 563-573
- Pain, B. F. & Thompson, R. B. 1989. Ammonia volatilization from livestock slurries applied to land. In : Hansen, J. A. & Henriksen, K (eds) Nitrogen in organic wastes applied to soils. Academic Press. San Diego, CA.
- Gaines; P.T & Gaines, S.T. 1994. Soil Texture Effect on Nitrate Leaching in Soil Percolates. Common. Soil Sci. Plant Anal., 25(13-14), 2561-2570
- Rauch, W. & Becker, W. (2000). Waste sludge disposal in extreme alpine environments. Waste Management & Research. 18: 33-40.
- Ronald, B.; Sawhill & Ferguson, B.K. 1998. The potential for recycling municipal sewage sludge as a substrate for wetland creation. Landscape and urban planing. 42: 123-134.
- Saguer, M. E. 1997. Emissions de N₂O i desnitrificació en sòls agrícoles i d'ecosistemes naturals. Factors de regulació. Tesi doctoral. Universitat de Girona.
- SAPG Working Group, 2000. E C Nitrates Directive (91/676/EEC): Draft Regulations Establishing the Action Programme Measures to Apply in the Ythan Nitrate Vulnerable Zone. SAC, Auchincruive. <http://www.scotland.gov.uk/deleted//consultations/agriculture/ythan-06.asp#5>
- Smith, S.R ; Woods, V & Evans, T.D. 1997. Nitrate dynamics in biosolids-treated soils. I. Influence of biosolids type and soil type. Bioresource Technology 66 : 139-149
- Sommers, L.E. 1977. Chemical composition of sewage sludges and analysis of the potential use as fertilizers. J. Environ. Qual. 6: 225-232.
- Stevenson, F.J., 1986. Carbon balance of the soil and role of organic matter in soil fertility. In: Stevenson, F.J. (Ed.), Cycles of Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. Wiley-Interscience Publications/John Wiley and Sons, New York, pp. 45-77.
- Terry, R.E. 1986. Nitrogen transformations in histosols. In Chen, Y. & Avnimelech, Y. 1986. The role of organic matter in modern agriculture. Chapter 4. Martinus Nijhoff publishers. Dodrecht/Boston/Lancaster.
- Van der Moolen, J.; Bussink, D. W., Vertreg, N., Van Faasen, H. G. & Den Boer, D. J. 1989. Ammonia volatilization from arable and grassland soils. In : Hansen, J. A. & Henriksen, K (eds) Nitrogen in organic wastes applied to soils. Academic Press. San Diego, CA.
- Wheatley, R.E; Ritz, K.; Crabb, D.; Caul, S. 2001. Temporal variations in potential nitrification dynamics in soil related to differences in rates and types of carbon and nitrogen inputs. Soil Biol. & Bioch. 33 : 2135-2144.
- Werther, J. & Ogada, t. 1997. Sewage sludge. Progress in Energy and combustion Science. 25 : 55-116.

- White, C.S.; Loftin, S.R. & Aguilar, R. 1997. Application of biosólids to degraded semiarid rangeland: nine-year responses. *J. Environ. Qual.* 26: 1663-1671.
- Whitford, W.; Adon, E.F.; Freckman, D.W.; Steinberg, Y. & Parker, L.W. 1989. The effects of organic amendment on soil biota on a degraded rangeland. *Journal of Range Management.* 42: 56-60.

CAPÍTOL 5

RESPOSTA DE LA VEGETACIÓ A L'APLICACIÓ DELS FANGS

5.1 INTRODUCCIÓ

L'establiment o restabliment de la coberta vegetal és potser l'indicador més evident dels efectes que provoquen les esmenes orgàniques utilitzades i és un pas imprescindible en tot procés de restauració (DoE, 1989). Donades les propietats, ja comentades en altres capítols de la tesi, que els fangs confereixen al sòl com són, la millora de l'estabilitat estructural (Sort i Alcañiz, 1999), l'increment de la capacitat de retenció d'aigua (Tate, 1987; Mbagwu., 1989), però sobretot com a proveïdors de macronutrients (N, P, K) necessaris per les plantes (Cheung *et al.*, 2000) per iniciar amb èxit la rehabilitació del sòl (Sooper, 1992).

Els assaigs amb plantes en mesocosmos permeten determinar la germinació potencial de les llavors i efectes sobre els primers estadis de creixement, ja que en condicions de camp els resultats no poden repetir-se amb exactitud. Els mètodes de laboratori, per tant, han estat desenvolupats de manera que les condicions externes estiguin controlades per tal d'obtenir una germinació més regular, més ràpida i completa per a la majoria de mostres d'una espècie en particular (International Seed Testing Association, 1999). Així doncs, aquest tipus d'assaigs poden revelar els efectes directes dels fangs sobre la vegetació. Per una banda, la resposta immediata de la planta davant l'entrada de nutrients però, també, per detectar possibles inhibicions provocades per alguna substància tòxica que aquests contenen. D'acord amb Junoven *et al.*, (2000) les anàlisis químiques no són suficients per avaluar els efectes tòxics, ja que no és possible analitzar tots els components químics que contribueixen a la toxicitat. Les línies guia de la OECD (1984) per plantes, estan dissenyades per avaluar els efectes potencials del tractament en la germinació i els primers estadis de creixement de les plantes superiors, després de l'exposició de la substància testada al sòl. Nombrosos autors han fet servir llavors de plantes superiors en tests de fitotoxicitat, ja que, en general tenen un cost moderat, són fàcils de realitzar i són apropiats en els assaigs amb mescules sòl-adob (Wang, 1991). En treballs posteriors, Wang *et al.*, (2001), descriu els avantatges que ofereixen aquest tipus d'assaigs. Entre les més rellevants, (i) les llavors assecades i inactives sota condicions adverses tindran una baixa viabilitat i, al contrari, en condicions favorables experimentaran canvis ràpids. A més, durant aquest període, les llavors germinades són molt sensibles a l'estrès ambiental; (ii)

possibilitat d'emmagatzematge de les llavors durant un llarg període, cosa que permet la repetició dels assaigs; (iii) en aquest tipus d'assaig no s'addicionen nutrients a l'aigua de rec dels controls. Així doncs, els bioassaigs amb plantes desenvolupats en la primera part d'aquest estudi, on s'ha mesurat determinats paràmetres relacionats amb el cicle vegetatiu, com són la germinació de les llavors, el desenvolupament de la part aèria i el contingut de clorofil·la i carotenoids, poden ser bons indicadors dels efectes dels fangs.

Segons Jorba i Andrés (2000), l'addició de fangs al sòl afavoreix la germinació de les llavors de les espècies assajades. En el mateix treball els autors citats han emprat diverses espècies herbàcies i han determinat els efectes de l'aplicació de fang fresc aeròbic. Entre les espècies estudiades es troben les dues plantes farratgeres que hem sembrat en aquest experiment: *Dactylis glomerata* i el raigràs anglès (*Lolium perenne*). Aquestes espècies solen formar part de mesclades emprades en pràctiques de revegetació de talussos (Cano et al., 2002; Arienzo et al., 2003).

El que s'espera com a resultat de l'aplicació de diversos tipus d'esmenes orgàniques, en aquest cas de fangs de depuradora, no només es basa en els efectes immediats relacionats amb la nutrició de la planta si no també en implicacions a llarg termini sobre l'estabilitat i productivitat de l'ecosistema (Tate, 1987). Els sòls degradats han perdut la majoria de les qualitats del sòl original, de manera que difícilment es podran revegetar de forma natural i/o en un temps relativament curt. Per aquesta raó, per que es produeixi una revegetació accelerada es requereix un medi on les rels puguin créixer, permeti introduir artificialment plantes que puguin adaptar-se, i/o aconseguir la millora de les condicions físiques, químiques i microbiològiques de manera que les noves comunitats de plantes puguin desenvolupar-se (Marx et al., 1995). Molts treballs mostren un increment en la biomassa i el recobriment vegetal després de l'aplicació de fangs de depuradora al sòl (Fresquez et al., 1990; Navas, et al 1999; Walter et al 2000). En relació als riscos associats a l'aplicació dels fangs, deguts a alguna substància que continguin, l'estudi dels canvis en l'estructura de les comunitats (composició d'espècies i proporció d'herbes) pot servir-nos per examinar si es produeixen canvis entre els diferents tractaments. La contaminació de l'habitat i la modificació de les condicions ambientals (ex. qualitat del sòl) provoca canvis en la diversitat i la productivitat de les plantes (Vasseur, et al., 2000). Donades les característiques dels fangs, al contenir en abundància els nutrients necessaris per les plantes hi ha també normalment una resposta positiva en el creixement dels arbres (Berry, 1987; Henry et al., 1993; Marx et al., 1995). En els treballs de Berry (1987), es compara el creixement de diverses espècies arbòries desenvolupades en sòls esmenats amb fangs de

depuradora i fertilitzants minerals. En la majoria dels estudis s'observa que els arbres de les zones que han rebut fangs experimenten major creixement que els que han rebut fertilitzant mineral. No obstant, aquest autor estableix un òptim de creixement en funció de la dosi, 34 MG ha^{-1} . A més, els fangs s'apliquen normalment mesclats dins la capa superficial del sòl, excepte en zones forestals on no convé pertorbar la capa superficial per risc d'erosió. Al haver aplicat, en el cas que ens ocupa, una dosi inferior (unes 10 Mg ha^{-1}), i en superfície, serà molt interessant observar la resposta en el creixement dels arbres davant una dosi moderada de fangs, i avaluar-ne els efectes directes en un període de temps relativament llarg. Així doncs, mitjançant la mesura de la producció vegetal, els inventaris de vegetació per determinar la diversitat riquesa florística, i el creixement dels arbres, és possible avaluar els efectes dels fangs a llarg termini i, per tant, valorar la sostenibilitat d'aquestes pràctiques en condicions naturals.

En aquest treball es vol determinar els efectes sobre les plantes de l'aplicació dels tres tipus de fangs emprats (fresc, compostat i assecat tèrmicament):

(1) en condicions controlades: sobre la germinació i els primers estadis de creixement, la producció i la concentració de pigments de dues espècies de gramínies, *Dactylis glomerata* i *Lolium perenne*, sembrades sobre dos substrats diferents, (sauló i argilós).

(2) en condicions de camp: sobre la vegetació a través de la mesura de la producció vegetal, l'estimació de la riquesa específica i més a llarg termini, el creixement dels arbres.

Tot això, amb l'objectiu de valorar quins dels tipus de fangs pot ser més adequat per a la recuperació de dos sòls degradats, un sòl format sobre margues (*Udic Calciustep*) i un sòl format sobre gresos (*Oxyaquic Haplustalf*).

5.2. EFECTES SOBRE LA GERMINACIÓ I CREIXEMENT EN CONDICIONS CONTROLADES

5.2.1 DISSENY EXPERIMENTAL I PREPARACIÓ DELS BIOASSAIGS

S'han preparat vuit tipus de substrat (sis mescles sòl-fang i els dos controls) emprant els mateixos materials utilitzats en les incubacions de laboratori (capítol 2): un sòl argilós i un de sorrenc o sauló i els tres tipus de fangs procedents de l'EDAR de Blanes de la partida de març del 2000 (fresc, compostat i assecat tèrmicament). S'han col·locat en contenidors (testos) de 4 L de capacitat i sobre ells s'han sembrat dues espècies de gramínies (*Lolium perenne* i *Dactylis glomerata*). Al capítol 2 es mostren les principals característiques dels sòls i dels fangs utilitzats

El càlcul de les dosis de fangs a aplicar es va realitzar en base al contingut de matèria orgànica que es volia assolir a la mescla amb sòl – un 3 % - equivalent a la dosi baixa de l'experiment d'incubacions (capítol 2). Tenint en compte el percentatge en matèria orgànica dels fangs, d'un 67% pel fang fresc, 63% el fang compostat i un 64% l'assecat tèrmicament i la seva humitat (fang tèrmic: 14%, fang deshidratat: 80%, fang compostat: 38%).

El substrat amb l'espècie sembrada constitueix el que hem anomenat tractament. Per cada tractament es van a realitzar tres rèpliques, cada una de les quals es va marcar amb un 1, 2 o 3. En total s'han preparat 48 contenidors (2 sòls × 4 esmenes × 2 espècies × 3 replicats).

A la figura 5.1 presentem les combinacions assajades i els codis emprats per a identificar els tractaments.

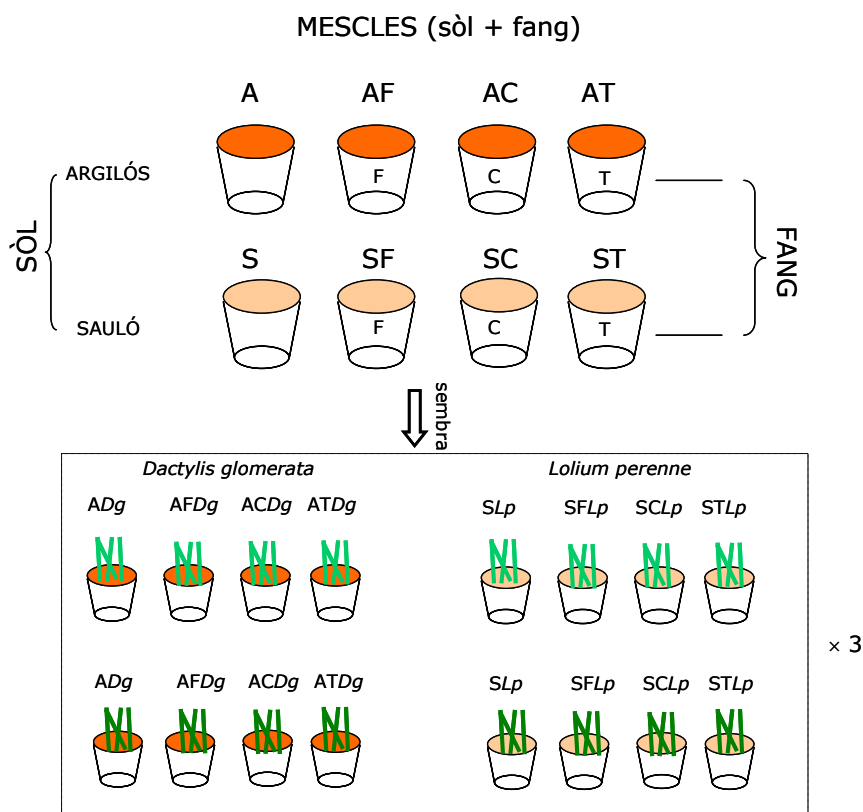


Figura 5.1. Esquema del disseny experimental

Les mesclades de cada sòl amb els tres tipus de fangs es van fer totes el mateix dia (8/10/01) procurant que quedessin ben homogènies. A la taula 5.1 s'indiquen les quantitats necessàries de cada tipus de fang.

Taula 5.1 Quantitats de fangs emprades per fer les mesclades

	Kg MO fang/ 100 Kg sòl	Kg fang / Kg MO fang	Kg fang/ 100 Kg sòl sec	Kg fang sec/ 100Kg fang	Kg fang/ 100 Kg sòl
Fang assecat tèrmicament	3	64	4.69	86	5.45
Fang fresc	3	67	4.48	20	22.4
Fang compostat	3	63	4.76	62	7.6

PREPARACIÓ DELS TESTS I SEMBRA DE LLAVORS:

Sobre aquestes mesclades sòl+fang s'han sembrat dues espècies de gramínies: *Dactylis glomerata* var. MICOL i *Lolium perenne* var. TOVE (Semillas Fitó S.A.).

Es varen sembrar 200 llavors en cada contenidor, en una superfície de (314 cm²) per evitar que el creixement fos competitiu i també per facilitar el recompte de les plàntules

germinades. La sembra va ser superficial procurant que les llavors ocupessin tota la superfície del test.

L'experiment es va realitzar en testos d'una capacitat aproximada de 4,5 Kg i d'un diàmetre màxim de 22 cm. Per evitar un drenatge excessiu es va col·locar una malla al fons dels tests. Per tal de facilitar la germinació de les llavors, al moment de la sembra es va saturar el sòl. La resta del temps s'ha mantingut el sòl a capacitat de camp. L'experiment s'ha realitzat en condicions d'hivernacle amb llum solar natural filtrada a través de vidre corrent. La durada de l'experiment ha estat de 69 dies, moment en el que bona part dels contenidors ja havien assolit un desenvolupament important.

5.2.1.1 EFECTES SOBRE EL CREIXEMENT

Per a determinar l'alçada de les plantes es van fer cinc mesures als 8, 18, 27, 46 i 67 dies. En cada test i temps de mostreig es van mesurar 10 plantes escollides l'atzar; es va calcular la mitjana de cada test i també la mitjana i desviació de cada tractament.

5.2.1.2 EFECTES SOBRE LA PRODUCCIÓ VEGETAL

En cada test es va tallar la part aèria de 10 plantes escollides a l'atzar i es van fer mesures del pes fresc i del pes sec per planta (després de ser assecades a 80°C durant 24h), als 46 i 67 dies. Els resultats s'han expressat en $g\ m^{-2}$ (sms), obtinguts com a mitjana de les mesures de les 10 plantes a cada test.

Finalment, als 69 dies es va mesurar el pes fresc i sec de les plantes que van sobreviure en cada test i es va calcular l'equivalent al pes s'obtindria si no s'haguessin extret plantes en mostres anteriors.

5.2.1.3 PIGMENTS VEGETALS

La determinació dels pigments es va realitzar prenent un nombre variable de plantes (3-6 per test), en funció del seu pes. Seguint el mètode d'Arnon, publicat per Bruinsma (1963). Com a mínim es necessiten 0.2 g de material fresc, lliure de parts mortes o seques. Després de tallar les fulles en trossos més petits es trituren en un morter que conté 2 ml d'acetona al 80% fins que s'alliberen tots els pigments. S'afegeix una mica de bicarbonat per evitar la baixada del pH. Es decanta l'homogeneïtzat del morter en un embut Buchner i es filtra al buit rentant bé les parets del morter amb acetona al 80%. El filtrat es transfereix a un matràs aforat de 25 ml i es porta fins aquest volum amb acetona al 80%. Sense diluir, es fa la lectura d'absorvència espectrofotomètrica de l'extracte a 660, 645 i 470 nm. Els

càlculs de concentració de clorofil·les i carotenoids totals es basen en les fórmules de Lichtenthaler et al (1983):

$$Cla = (12,21 \times A_{660}) - (2,81 \times A_{645}) \quad Clb = (20,13 \times A_{645}) - (5,03 \times A_{660})$$

$$Car.tot = \frac{(1000 \times A_{470}) - (3,27 \times Cla) - (104,4 \times Clb)}{229}$$

Els resultats s'han expressat en: $\mu\text{mols pigment g}^{-1}$ (pes sec de planta), tenint en compte un pes molecular de 900 per a les clorofil·les i 600 per als carotenoids (Margalef, 1991). Amb aquestes dades s'ha calculat la mitjana i la desviació estàndard de la concentració de cada pigment per tractament.

5.2.1.4 PROVES PRÈVIES DE GERMINACIÓ

Prèviament a la realització d'aquest experiment s'ha fet unes proves preliminars per obtenir unes orientacions sobre el comportament d'aquestes espècies sobre aquests materials. Les proves han estat:

Germinació en placa amb aigua destil·lada: les proves de germinació ens permeten observar en condicions de laboratori l'aparició i el desenvolupament de la planta en una primera etapa on es pot saber si podrà créixer de manera satisfactòria sota condicions favorables del sòl (International Seed Testing Association, 1999). Es va realitzar una prova control de germinació per a les dues espècies, en plaques de petri amb 60 llavors, i sobre dos papers de filtre Whatman #1, xops d'aigua destil·lada, (OECD, 1984) de *Lolium perenne* i *Dactylis glomerata*. Segons el resum comparatiu de mètodes d'assaigs amb plantes (GCPF, 2000), l'espècie *Lolium perenne* s'empra en el OECD 208, US FIFRA, ISO 11269-2, US TSCA, ASTM E1598, AFNOR X 31-202.

Es va fer un primer recompte de les llavors germinades als set dies i un últim als catorzè. Es va considerar que una llavor era viable sí sota condicions favorables de llum, humitat i temperatura podia seguir desenvolupant-se, és a dir si mostrava una combinació específica d'algunes de les següents estructures essencials: aparició de la radícula o els primers pèls radiculars.

Els controls de germinació en placa utilitzant aigua destil·lada van donar percentatges del $90 \pm 2.0\%$ per a *Lolium perenne* i del $83 \pm 5.0\%$ per a *Dactylis glomerata*, resultats una mica per sota dels especificats en les etiquetes de qualitat de les llavors adquirides però dins del normal per a aquestes espècies.

Germinació en extractes de mescles sòl+fang: per avaluar l'efecte dels compostos solubles presents a les mescles de sòl i fangs es va preparar una sèrie equivalent a l'anterior però en lloc d'aigua es va afegir l'extracte aquós obtingut de la de pasta saturada de cada fang. Es va mesurar la conductivitat d'aquests extractes. A cada placa es van posar 60 llavors. Es va fer un primer recompte de les llavors germinades als set dies i un últim als catorze. Es va considerar que una llavor era viable sí, emergien els primers pèls radiculars. Es va incloure un blanc amb una solució de KCl, a una conductivitat elèctrica equivalent a la dels extractes, per diferenciar l'estrès osmòtic d'altres possibles efectes tòxics.

Com a repetició de l'experiment de germinació directa sobre els tests, es va fer un assaig en plaques plenes de les mescles de sòl i fang. A cada placa es van ficar 60 llavors sobre una capa d'un centímetre de gruix de les corresponents mescles i, posteriorment, es va regar amb aigua destil·lada. Als catorze dies de la sembra es va fer un únic recompte i es van calcular els percentatges de germinació.

En paral·lel, es va preparar una altra prova equivalent sobre plaques amb mescles de sòl + fang on es van col·locar 60 plàntules, prèviament germinades en aigua destil·lada. Als 10 dies es va fer un recompte de les plàntules supervivents.

5.2.2 RESULTATS I DISCUSSIÓ

5.2.2.1 EFECTES SOBRE LA GERMINACIÓ: RESULTATS DE LES PROVES PRÈVIES DE GERMINACIÓ .

La germinació de les llavors sobre extractes de la mescla de sòl amb fang presenta lleugeres diferències (taula 5.2). En primer lloc, en funció del tipus de sòl, amb un 88.3 % de viabilitat en el sòl de sauló front al 78.3 % en el sòl argilós. En aquest darrer sòl, sembla haver-hi una menor germinació en els extractes amb fang assecat tèrmicament on també es va evidenciar una clara reducció de la longitud de la radícula, suggerint que s'ha produït alguna afectació sobre el desenvolupament de les cèl·lules de les arrels. Per altra banda, en els extractes del sòl arenós la reducció de la germinació s'ha produït també en les mescles amb fang compostat cosa que implica que no hi ha un patró clar pel que fa a la resposta en la germinació en els extractes de les mescles sòl+fang. En aquest darrer cas, la menor germinació podria ser deguda a una concentració de sals major en aquest extracte de fang compostat ($4,31 \text{ dSm}^{-1}$) mentre que els extractes de fang tèrmic tenen una conductivitat inferior a $2,2 \text{ dSm}^{-1}$.

Taula 5.2. Germinació de *D.glomerata* als 15 dies sobre extractes del sòl arenós (S) i argilós (A) tractats amb tres tipus de fangs de depuradora: fresc (F), tèrmic (T) i compostat (C).

Valors mitjans de tres rèpliques.

sòl	Planta	Unitat	Extracte de sòl + fang			Extracte de sòl
			F	T	C	control
arenós (sauló)	<i>D.glomerata</i>	%	88,3	73,0	63,0	88,3
argilós	<i>D.glomerata</i>	%	71,6	63,0	75,0	78,3

Al llarg de l'experiment es van fer tres recomptes de les llavors germinades als contenidors. Per *L. perenne* la primera mesura es va fer als 8 dies, la segona als 18 i l'última als 27. Per *D. glomerata* la primera mesura es va fer als 11 dies, la segona als 20 i l'última als 29. Amb les dades de la última mesura, quan es va considerar que s'havia arribat al màxim de germinació, es van calcular els percentatges corresponents.

Pel que fa a les espècies sembrades, s'observa que les llavors de *D.glomerata* tenen menor viabilitat que les de *L.Perenne*, entre un 50-60% front al 80% de *L.Perenne* en els sòls no esmenats (figura 5.2).

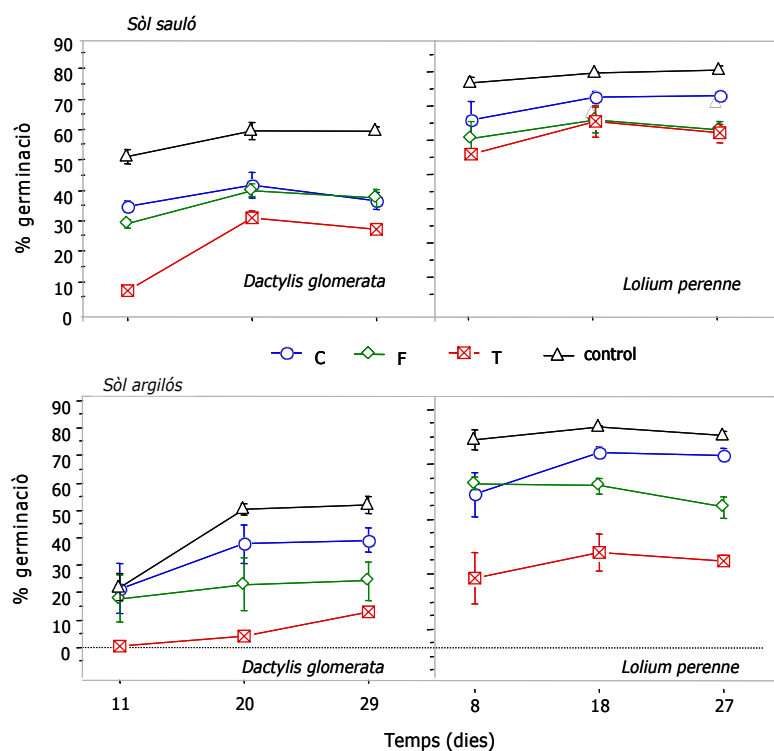


Figura 5.2. Corba de germinació (%) de les llavors de les dues espècies (*Dactylis glomerata* i *Lolium perenne*), sembrades en contenidors: dos sòls (argilós i sauló); tres tipus de fang (compostat=C, fresc=F i assecat tèrmicament=T). N=3

S'observa que en totes les mescles de sòl+fang hi ha una reducció significativa ($p=0.0003$) de la germinació, en relació al sòl control. Aquesta reducció hem de suposar que és deguda en part a la salinitat de les mescles (sòl de sauló = $0,3 \text{ dS m}^{-1}$ i mescla fangs+sòl sauló = $2,9 \pm 1,6 \text{ dS m}^{-1}$; sòl argilós = $0,6 \text{ dS m}^{-1}$ i fangs+sòl argilós = $2,7 \pm 0,6 \text{ dS m}^{-1}$). Entre tipus de fangs aquesta disminució en la germinació de les llavors és encara més acusada en els sòls tractats amb fang assecat tèrmicament. Això, ens pot estar indicant que s'està produint una certa inhibició per algun component d'aquest fang. A la taula 5.3 trobem el valor mig de germinació als 27 i 29 dies, per *Lolium perenne* i *Datylis glomerata* respectivament.

Taula 5.3 Germinació directa (%) de *L.perenne* i *D.glomerata* sobre el sòl arenós (S) i argilós (A) tractats amb tres tipus de fangs de depuradora: fresc (F), tèrmic (T) i compostat (C)

			Mescla sòl + fang			sòl
sòl	Planta	Unitat	F	T	C	control
arenós (sauló)	<i>D.glomerata</i>	%	37,5± 4,8	27,0± 4,0	36,5± 4,8	59,7± 2,0
	<i>L.perenne</i>	%	60,3± 5,3	59,3± 5,1	71,5± 2,3	80,3± 2,0
argilós	<i>D.glomerata</i>	%	24,2± 12,3	13,2± 2,0	39,2± 7,8	52,0± 5,3
	<i>L.perenne</i>	%	54,5± 6,7	35,0± 3,0	73,5± 4	80,8± 2,4

En les mescles de sòl + fang es produeix una clara disminució, especialment en la mescla de sòl argilós amb fang assecat tèrmicament. S'observa, per tant, que el percentatge de germinació és sempre més alt al control que als tractaments amb fangs. Els valors més baixos corresponen als tractaments amb fang assecat tèrmicament.

5.2.2.2 EFECTES SOBRE EL CREIXEMENT

A la taula 5.4 s'observa que el creixement de les plantes en el sòl argilós durant el primer mes no mostra diferències significatives entre el control i el tractament amb fang compostat, però en canvi és menor en els tractaments amb fang fresc i assecat tèrmicament, especialment en aquest darrer. Els efectes són més marcats en *D.glomerata* que en *L. Perenne*. En el sòl arenós s'observa exactament la mateixa tendència però amb un creixement major en tots els casos.

En un període més llarg de temps (69 dies), l'evolució del creixement en alçada permet detectar millor les diferències entre tractaments (Taula 5.5). Cal destacar que, excepte en el cas de *L.perenne*, en el sòl arenós les plantes que havien germinat en les mescles amb fang assecat tèrmicament varen morir a partir de la tercera setmana, i per tant no hi ha dades de l'alçada als 69 dies. Pel que fa a les altres mescles, no es van observar

diferències importants en l'alçada entre les plantes desenvolupades en la mescla sòl i el fang compostat i fresc, sent totes elles significativament superiors als respectius controls.

Taula 5.4. Creixement en alçada (t=30 dies) en les mescles de sòl arenós (S) i argilós (A) tractats amb tres tipus de fangs de depuradora: fresc (F), tèrmic (T) i compostat (C).

(N=10). Les lletres indiquen les diferències significatives ($p < 0,05$) entre tractaments

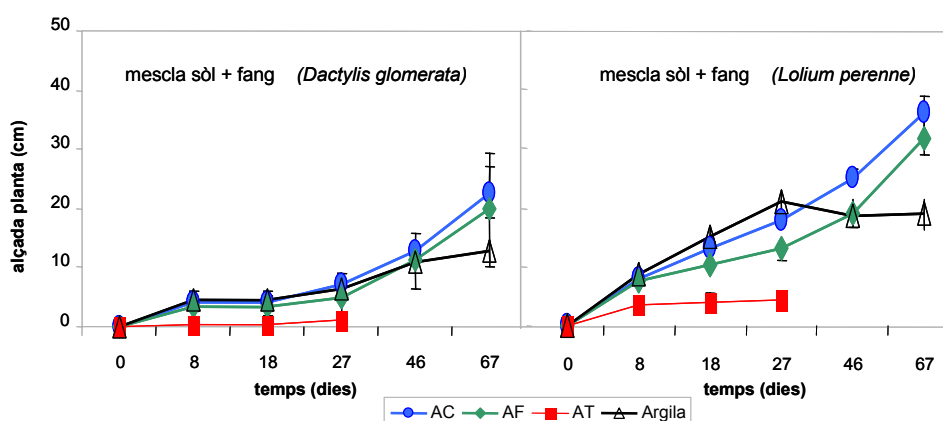
sòl	Planta	Unitat	Tipus de fang						Control	
			F		T		C		-	
Arenós (salut)	<i>D.glomerata</i>	cm	11,4± 1,2	b	4,8± 1,2	c	13,3± 0,4	a	12,8± 0,8	ab
	<i>L.perenne</i>	cm	23,5± 3,2	a	19,0± 0,7	b	24,5± 0,9	a	23,0± 1,2	a
Argilós	<i>D.glomerata</i>	cm	6,6± 3,1	a	2,0± 0,4	b	9,5± 1,8	a	9,5± 1,1	a
	<i>L.perenne</i>	cm	12,9± 1,8	c	4,3± 1,6	d	17,8± 0,5	b	21,2± 1,2	a

Taula 5.5. Creixement en alçada als 2 mesos aproximadament (t=69 dies) en les mescles de sòl arenós (S) i argilós (A) tractats amb tres tipus de fangs de depuradora: fresc (F), tèrmic (T) i compostat (C).

(N=10). Les lletres indiquen les diferències significatives ($p < 0,05$) entre tractaments. ↓ indica que les plantes es van morir.

sòl	Planta	Unitat	Tipus de fang						Control	
			F		T		C		-	
Arenós (salut)	<i>D.glomerata</i>	cm	24,9±1,3	a	↓		21,7±1,4	a	15,7±3,0	b
	<i>L.perenne</i>	cm	33,9±1,8	a	22,7±0,8	b	36,9±3,5	a	20,4±1,9	b
Argilós	<i>D.glomerata</i>	cm	19,8±9,5	a	↓		22,7±4,5	a	12,8±2,0	a
	<i>L.perenne</i>	cm	31,9±2,8	a	↓		36,0±2,8	a	18,8±2,5	b

A la figura 5.3 es pot veure l'evolució del creixement de les dues espècies en els diferents tractaments.



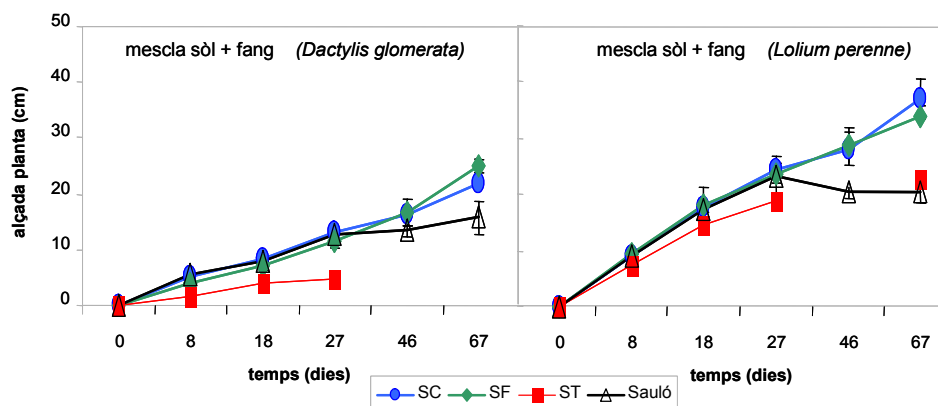


Figura 5.3 Corbes de creixement en alçada de *Lolium perenne* i *Dactylis glomerata* en els dos sòls (argilós i sauló) adobats amb els tres tipus de fangs de depuradora:

fresc (F), compostat (C), tèrmic, i el respectiu control (O). Alçades mitjanes (cm) de 10 plantes.

Cal destacar que les plantes crescudes en les mescles de sòl amb fang fresc i compostat fins al 27è dia no es diferencien de les plantes control, amb l'excepció de *Lolium perenne* en les mescles del sòl argilós, on la diferenciació comença a produir-se a partir del 18è dia. L'estabilització en el creixement que es detecta en les plantes controls la podem atribuir a un esgotament de les reserves nutritives que hi havia al sòl i, per tant, en aquest cas podem dir que hi ha un efecte positiu relacionat amb l'aportació de nutrients per part d'aquests fangs. El fet que no hi hagi diferències entre els tractaments amb fang compostat i fresc es degut a què, malgrat que les concentracions de nutrients essencials als dos materials puguin ser diferents, aquests han estat aportats en quantitats relativament altes i, en conseqüència, no s'han esgotat en el període assajat. Finalment, pel que fa a les diferències observades entre les dues plantes testades, en l'espècie *D. glomerata*, els creixements absoluts varen ser menors i més heterogenis

Atès els importants efectes tòxics detectats en el tractament amb fang tèrmic, es va repetir l'experiment amb un altre lot de fang tèrmic de la mateixa planta de depuradora, però de la partida de fangs del mes de març de 2002. Els efectes inhibidors sobre la germinació varen ser del mateix ordre (*Lolium*, 38,6% en sòl argilós i 49,7% en sòl de sauló) però en canvi el creixement en aquest cas no es va veure afectat, donant resultats semblants al control. Es a dir, la toxicitat va impedir la germinació de moltes llavors però les que ho varen poder fer no van tenir problemes per créixer. En qualsevol cas, es detecten inhibicions en la germinació i problemes en el creixement de les plantes afectades principalment per algunes partides de fangs assecats tèrmicament.

5.2.2.3 EFECTES SOBRE LA PRODUCCIÓ VEGETAL

El pes sec de les plantes s'ha pogut determinar en tots els tractaments, llevat del de fang tèrmic en sòl argilós per manca d'exemplars. A la figura 5.4 es presenten aquests resultats.

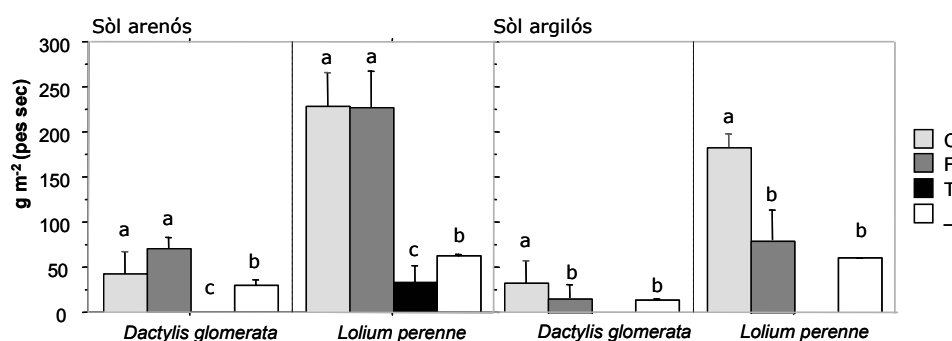


Figura 5.4 Efectes sobre la producció vegetal.

Les lletres indiquen les diferències significatives ($p < 0,05$) entre tractaments

En les condicions experimentals utilitzades, la producció de biomassa vegetal mesurada als 67 dies va ser major en *L.perenne* que en *D.glomerata* ($p < 0,0001$). Per les dues espècies estudiades, l'anàlisi de la variància (ANOVA 2 factors) revela que, tant el tipus de sòl com el tractament i la seva interacció, provoquen efectes significatius (taula 5.6) demostrant, d'aquesta manera, que hi ha diferències en la producció de biomassa en funció de la mescla emprada. Pel que fa al sòls, s'observa una major producció vegetal en els tractaments sobre sauló (*L.perenne*: $p < 0,0001$; *D.glomerata*: $p = 0,0028$).

Taula 5.6. Resultats de l'anàlisi de la variància (ANOVA dos factors) en base al tractament (tipus de fang i control) i el tipus de sòl (sauló i argilós).

Es presenten els resultats de les dues espècies per separat, donat que tenen diferent comportament.

	Factor	g.l	Suma quadrats de	F-valor	P-valor
<i>L.perenne</i>	sòl	1	19391,7	32,542	<0,0001
	fang	2	132131,0	73,911	<0,0001
	Sòl x fang	3	17370,7	9,717	0,0007
<i>Dactylis glomerata</i>	sòl	1	2547,3	12,440	0,0028
	fang	3	6622,4	10,780	0,0004
	Sòl x fang	3	2422,8	3,944	0,0278

Les plantes que van créixer en sol adobat amb fang compostat presenten, en tots els casos una producció (referida a pes sec) significativament major que el control. En el cas de les mescles amb fang fresc sempre va ser major que el respectiu control, exceptuant el tractament de *D.glomerata* en sòl argilós, on l'anàlisi de la variància no va resultar significativa. Aquestes observacions suggereixen que hi ha una certa afectació del creixement de les plantes que han rebut fang fresc, ja que s'esperaria que es produís un

desenvolupament similar a l'obtingut en el compost, atesa l'abundància de nutrients aportada pels fangs. Com ja hem comentat abans, no es va poder mesurar la producció en el tractament amb fang tèrmic per manca de material vegetal, fet que indica una forta inhibició.

5.2.2.4 PIGMENTS VEGETALS

En la figura 5.5 es presenten els resultats de la concentració dels pigments analitzats en relació al pes sec de la planta ($\mu\text{mols g}^{-1}\text{pes sec}$)

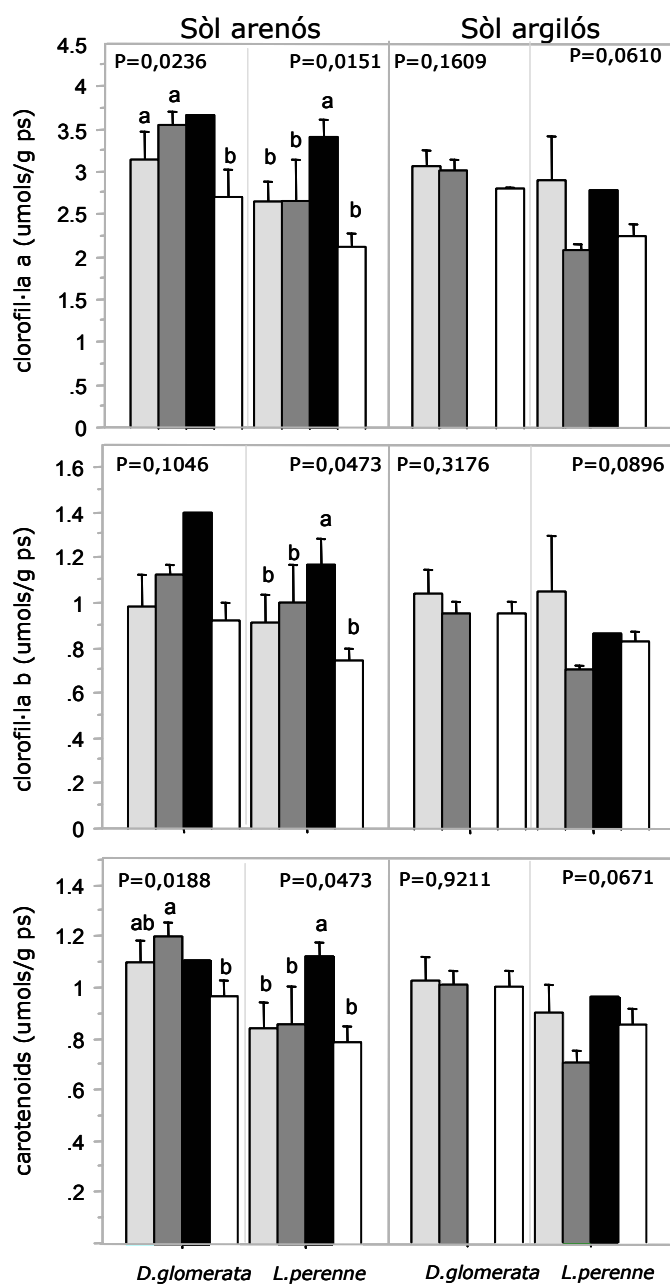


Figura 5.5 Concentració de pigments (clorofil·la a i b, carotenoids) en relació al pes sec de planta a les fulles de *Dactylis glomerata* i *Lolium perenne* procedents de plantes crescudes en dos sòls (argilós i arenós) adobats amb els tres tipus de fangs de depuradora (C = compostat; F = fresc i T = assecat tèrmicament; "-" = Control).

Les lletres indiquen les diferències significatives ($p < 0,05$) entre tractaments.

Com és habitual en les plantes superiors, la clorofil·la a és el pigment majoritari, seguit de la clorofil·la b i els carotenoids.

En el sòl argilós no s'han observat diferències entre tractaments. Únicament s'observa una certa tendència en les mescles amb fang compostat a incrementar la concentració de clorofil·les (a i b) en *Lolium perenne*. Per contra,

en les mescles amb sòl arenós, s'observa la tendència a una major concentració de pigments en els tractaments amb fangs, especialment en aquelles mescles fetes amb el fang assecat tèrmicament seguit de les de fang fresc. Pel que fa a la mescla amb fang assecat tèrmicament, les poques plantes que van créixer no tenien cap competència per la llum i donat el seu escàs desenvolupament els pigments es trobaven més concentrats als seus teixits. En menor grau, també succeeix el mateix en el tractament amb fang fresc. És conegut que les plantes quan creixen en medis eutròfics, rics en oligoelements, poden sintetitzar més pigments, però si hi ha algun factor inhibidor del creixement de la planta queden més concentrats en la seva biomassa. El nitrogen sol ser el principal factor que afecta en el contingut de clorofil·la *a* de la planta (Moorby i Besford, 1983). És possible que la menor concentració, tot i no resultar significativa, de clorofil·les (*a* i *b*) observades en el sòl argilós estigui relacionada amb l'elevat contingut de carbonats (sòl argilós = 25,4 % CaCO_3 ; sauló = 0,6 %) (veure capítol 2). Sent el ferro essencial per la síntesi de la clorofil·la i donada la baixa solubilitat d'aquest element en sòls calcaris, podem pensar que les plantes desenvolupades sobre el sòl argilós tenen més dificultat en absorbir-lo i, per tant sintetitzaran menys clorofil·la.

5.2.3 CONCLUSIONS

A la dosi assajada (3% de matèria orgànica de fangs), es pot dir que es produeix una inhibició de la germinació de les espècies seleccionades. Pel que fa als sòls adobats amb fang, el fang fresc i compostat provoquen una inhibició moderada, en comparació al fang tèrmic on la inhibició és molt destacable. Part de la inhibició es pot explicar com a conseqüència de la salinització del sòl. No obstant, la forta reducció en la germinació de les llavors sembrades en els sòls adobats amb fang tèrmic, ens estan indicant que hi ha altres agents inhibidors.

El creixement de les plantes es veu afectat en els sòls que han rebut una partida determinada de fang tèrmic. En canvi, les plantes dels sòls esmenats amb fang fresc i compostat presenten un creixement normal, idèntic al control. L'estabilització en el creixement que es detecta als 30 dies en les plantes controls l'hem d'atribuir a un esgotament de les reserves nutritives que hi havia al sòl i, per tant, en aquest cas podem dir que els fangs fresc i compostat provoquen un efecte positiu, relacionat amb l'aportació de nutrients.

En les condicions experimentals utilitzades la major producció vegetal s'ha produït en els sòls adobats amb fang compostat i fang fresc, molt superior a la dels respectius controls.

La concentració de pigments (clorofil·la a,b i carotenoids) de les plantes adobades amb fangs en general no presenta grans diferències. No obstant, les plantes crescudes en les mescles amb fang assecat tèrmicament, i en algun cas en les mescles amb fang fresc, tenen una major concentració de pigments.

5.3 EFECTES DE DOSIS MODERADES DE FANG SOBRE LA VEGETACIÓ EN CONDICIONS DE CAMP

El treball es va desenvolupar a les parcel·les instal·lades a Taradell segons s'ha descrit al capítol 3 de la tesi.

5.3.1 DISSENY EXPERIMENTAL

L'estudi de la vegetació s'ha realitzat en les mateixes parcel·les descrites en el capítol 3. Les plantes es van inventariar la primavera següent a l'aplicació dels fangs, època de màxim desenvolupament. També es van fer mesures de biomassa i recobriment vegetal al llarg dels dos anys de durada de l'experiment. El creixement dels arbres es va mesurar al desembre anterior a les aplicacions (any 2001) i els dos anys successius per tal de comparar la incidència en el desenvolupament del port arbori. Únicament es va mesurar en les parcel·les de la Vallmitjana, ja que al Puig no hi havia un nombre suficient d'exemplars.

5.3.2 MATERIAL I MÈTODES

5.3.2.1 LA BIOMASSA VEGETAL HERBÀCIA

Per a la determinació de la producció vegetal, es va fer una estimació, a partir de la mesura de la biomassa vegetal, sobre una superfície delimitada per un anell de 53 cm de diàmetre situat a l'atzar dins de cada parcel·la. Per tal d'incloure al màxim la variabilitat existent dins de la parcel·la i obtenir una bona representativitat de la mateixa es van fer cinc mesures per parcel·la. Es van recol·lectar totes les plantes (només la part aèria) que es trobaven a dins del cercle. Les mostres recol·lectades es van assecar a l'estufa a 60°C fins a pes constant (aproximadament unes 48 hores).

5.3.2.2 LA VEGETACIÓ REGENERADA I INTRODUÏDA

A cada parcel·la es va instal·lar un transecte lineal permanent de 10 m. La composició florística s'anotà cada 20 cm al llarg d'aquest (50 punts per transecte), durant la primavera de l'any 2001 i 2002, 1 mes i 13 mesos després de l'aplicació dels fangs a la Vallmitjana, i a El Puig únicament l'any 2002, ja que a l'estiu del 2001 donat el retard en la sembra

encara no s'havien desenvolupat suficientment. Per tal d'estimar la riquesa florística (expressada com a número d'espècies) i el recobriment vegetal, s'ha aplicat el mètode dels punts alineats (Gounot, 1969).

La dada de recobriment vegetal correspon a la projecció vertical de la vegetació i s'ha calculat com el nombre de punts on s'interceptà vegetació respecte del total de punts del transecte, en tant per cent. Les dades de recobriment específic corresponen a percentatges de freqüències i s'han calculat com el número de contactes de l'espècie o del grup respecte al número de contactes totals amb vegetació.

Anàlisi de les dades:

La cobertura de la vegetació s'expressa com el percentatge de punts del transecte en els que alguna planta intersecta. La informació de vegetació (nombre d'espècies i cobertura de la vegetació) es va comparar en relació als tractaments mitjançant anàlisi de la variància. Per tal de normalitzar les dades, les percentuals (cobertura de la vegetació), etc., s'han transformat mitjançant la funció ($\arcsin \sqrt{x}$) i el número d'espècies mitjançant una transformació logarítmica. En tots els casos, les dades es presenten com a mitjanes de les dades sense transformar.

Els canvis en la vegetació s'han estudiat, tant pel total de la vegetació com per les espècies components (es mostren resultats només per a les espècies principals), i en funció de les formes vitals i d'altres agrupaments rellevants atesa la naturalesa dels tractaments aplicats. Les formes vitals⁶ considerades han estat: arbres (faneròfits, exloent: *Juniperus oxycedrus*, *Phyllirea angustifolia*, *Rubus ulmifolius*), arbusts (nanofaneròfis, incloent: *Juniperus oxycedrus*, *Phyllirea angustifolia*, *Rubus ulmifolius*), mates (camèfits), herbes perennes (hemicriptòfits), gramínies perennes (hemicriptòfits) i anuals (teròfits). Les espècies *Juniperus oxycedrus*, *Phyllirea angustifolia* i *Rubus ulmifolius*, s'han considerat dins la categoria d'arbusts, atesa la seva forma de creixement en l'àrea d'estudi. S'ha trobat un sol geòfit, *Eryngium campestre*, que no assoleix un recobriment important i ha estat inclòs dins la categoria d'herbes perennes.

S'ha analitzat l'efecte del tractament sobre el grup de les espècies sembrades (*Lolium perenne*, *Dactylis glomerata*, *Festuca arundinacea*) ja que no formen part de la vegetació regenerada natural. Altre grup analitzat ha estat el de les espècies ruderals (seguint la

⁶ Entre parèntesi les formes vitals, segons Raunkiaer

categorització de Bolòs *et al.*, 1990), degut a la hipòtesi que aquest grup podria veure incrementada la seva importància en recobriment i/o en nombre d'espècies com a conseqüència de l'aplicació del tractament. S'ha analitzat també el grup de les lleguminoses, degut a que aquestes espècies fixen Nitrogen i el tractament en podria modificar la seva importància relativa en la vegetació, tant en termes de cobertura com de nombre d'espècies. L'espècie *Coriaria myrtifolia* ha estat inclosa dins l'anàlisi del grup, degut a que es tracta també d'una espècie fixadora.

També s'han calculat les espècies més abundants, a través de l'estima de l'abundància segons Braun-Blanquet (1979), utilitzant una escala convencional de sis valors (+, 1, 2, 3, 4, 5), en funció del percentatge que representa aquella espècie respecte al total. En el llistat d'espècies, hem obviat les que representen menys de l'1% de la cobertura (+)

Finalment s'ha calculat l'índex de diversitat, a partir de la fórmula de Shannon-Weaver (1957) ja que pot ser particularment adequat per a l'estudi de la vegetació (Margalef, 1991). Aquest índex basat en la teoria de la informació té en compte el número d'espècies i la abundància relativa de les mateixes, on la diversitat s'expressa de la següent manera:

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \ln p_i \quad , \quad \text{sent} \quad \sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad \text{i} \quad \text{on} \quad p_i = N_i/N \quad \text{és a dir,}$$

la proporció de tots els individus en una comunitat (en aquest cas una parcel·la) que pertanyen a l'espècie *i*.

En aquest estudi ens hem limitat a mesurar la *diversitat* α , com a mesura de la diversitat puntual en una comunitat concreta (Terradas, 2001), representada pels diferents tractaments. Així doncs, obtindrem un valor de diversitat per a cada un dels fangs i el sòl control, és a dir quatre en total.

5.3.2.3 EL CREIXEMENT DELS ARBRES

Primer de tot es van etiquetar cada un dels arbres, roures i alzines de cada una de les parcel·les de la Vallmitjana. Això ha permès, també, fer una estima de la densitat d'aquestes dues espècies, prenent com a criteri els arbres de més d'un metre d'alçada inicial i obviant-ne els rebrots i peus secundaris. S'ha mesurat l'alçada dels arbres l'hivern abans de l'aplicació (temps = 0), l'hivern del 2001 (temps = 1), l'hivern de 2002 (temps = 2) i l'hivern de 2003 (temps=3), el diàmetre a 1,30 (dbh). Partint de l'alçada inicial, s'ha fet una mesura anual durant els dos anys següents, de manera que s'ha calculat el

creixement dels arbres en el període que va del desembre de 2001 fins al desembre de 2003.

Es van comptabilitzar els arbres que hi havia a cada parcel·la. En total 117 arbres repartits entre les 20 parcel·les, que equival a una densitat, de 292 arbres ha⁻¹. S'ha calculat el creixement relatiu en el primer any d'experiment, a partir de:

$$\text{Creixement relatiu: (RGR)} = \frac{(x_i - x_{i-1})}{x_{i-1}}$$

sent: x_i = alçada dels arbres a temps i .

x_{i-1} = alçada dels arbres a temps $i-1$

Donat que la variable estudiada no segueix una distribució normal, per tal de poder aplicar el test ANOVA i comparar els diferents tractaments, s'han hagut de transformar les dades, de la següent manera: $\arcsin\sqrt{RGR}$.

5.3.3 RESULTATS I DISCUSSIÓ

5.3.3.1 LA BIOMASSA VEGETAL HERBÀCIA

La fitomassa s'ha estimat a partir de la producció herbàcia i arbustiva a cada parcel·la. Al poc temps de l'aplicació dels fangs, després d'unes vuit setmanes, només es va mesurar a la Vallmitjana, ja que al Puig, tot just començaven a germinar les gramínies que s'havien sembrat. A la figura 5.6 estan representats els valors de biomassa vegetal a cada mostreig.

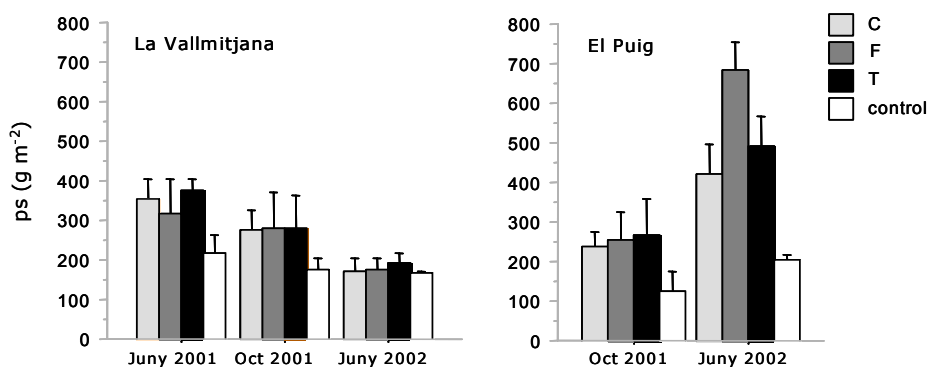


Figura 5.6. Comparació dels valors de biomassa vegetal entre els diferents tractaments ("c"=compostat; "f" deshidratat; "t"=tèrmic i "-"=control).

Tres mostres a la Vallmitjana (juny i octubre 2001, juny del 2002) i dos mostres al Puig (octubre 2001 i juny del 2002).

A la Vallmitjana, als dos mesos de l'aplicació dels fangs es veu una clara diferència entre les parcel·les fertilitzades i les control, amb una producció mitjana de $347,4 \pm 62,5$ g m⁻²,

front als $216,4 \pm 45,5 \text{ g m}^{-2}$ dels controls, és a dir, amb un increment del 37% aproximadament. Al següent mostreig tots els tractaments han sofert una disminució en la biomassa vegetal, però mantenint la proporció, de manera que hi continua havent les mateixes diferències entre les parcel·les adobades i els controls. Al cap d'un any, ja no s'aprecia cap diferència entre tractaments. Hi ha, per tant, una major producció a les parcel·les adobades, com queda demostrat amb l'ANOVA de mesures repetides (tractaments: $p=0,0011$) que es manté durant el primer any. El mateix anàlisi ens indica, també, que hi ha diferències entre els diferents mostreigs (temps: $p<0,0001$). La interacció (temps*tractament) no és significativa i, per tant, no hi ha diferències en el comportament dels tractaments en el temps, és a dir que incrementen i disminueixen de manera proporcional, seguint el mateix patró.

Al Puig, a la tardor del 2001 hi ha una producció lleugerament inferior a la de l'altra zona amb valors mitjans de $253,57 \pm 61,61 \text{ g m}^{-2}$ en les parcel·les fertilitzades, que no presentaven diferències entre elles i que, en percentatge, correspon a un increment del 50% respecte al control. La fitomassa al Puig difereix segons els tractaments (ANOVA [mesures repetides] tractament: $p=0,0007$; temps: $p<0,0001$ i temps*tractament: $p=0,0033$). Aquest anàlisi està indicant el que ja observava a la figura 5.5. En primer lloc, les parcel·les que han rebut fang tenen valors molt superiors als controls, i per tant, el factor tractament és significatiu. D'acord amb Fresquez *et al.*, (1990) i Walter, *et al.*, (2000) la producció herbàcia incrementa significativament amb l'aportació de fangs de depuradora. En segon lloc, hi ha diferències entre els dos mostrejos amb un fort increment en el segon i, per últim, en els dos mostrejos, hi ha un patró diferent per cada tractament. És a dir, l'increment no s'ha produït amb la mateixa intensitat a totes les parcel·les, com es pot veure amb els valors de biomassa vegetal al cap d'un any, on, les parcel·les que han rebut fang fresc presenten els valors més alts ($681,5 \pm 70,6 \text{ g m}^{-2}$), seguit del tèrmic ($489,7 \pm 76,8 \text{ g m}^{-2}$), el compostat ($419,7 \pm 76,3 \text{ g m}^{-2}$), i molt per sota, els controls ($205,2 \pm 10,2 \text{ g m}^{-2}$).

És important remarcar que entre el segon i el tercer mostreig es va fer una dallada manual, simulant l'acció del bestiar. Això explica la davallada de fitomassa a la Vallmitjana. Pel que fa al Puig, en aquest cas, la vegetació que hi ha són les gramínies sembrades i, per tant després de segar, van desenvolupar-se amb més força

5.3.3.2 LA VEGETACIÓ REGENERADA I INTRODUÏDA

A la figura 5.7 observem que, dos mesos després de l'aplicació dels fangs (juny 2001), els sòls esmenats amb fangs de depuradora experimenten un significatiu increment de la coberta vegetal ($p < 0,0001$), amb un recobriment mitjà del $88,5 \pm 1,6$ %, molt superior al dels controls ($60,6 \pm 6,4$ %). Les parcel·les esmenades amb fang fresc presenten un recobriment lleugerament més baix a les esmenades amb els altres dos fangs, tot i que les diferències no són significatives, degut a la gran quantitat de clapes de fang resultat de l'aplicació superficial. D'acord amb Guerrero, et al (2000), aquest increment del recobriment vegetal és el resultat de la millora de les propietats físiques, microbiològiques i químiques del sòl degudes a l'esmena orgànica. Aquestes millores, en part han estat discutides en el capítol 3 i 4 d'aquesta tesi, pel que fa a la millora de les propietats biològiques relacionades amb l'entrada de matèria orgànica fresca. També s'ha observat en el capítol 4 que el nitrat assoleix la major concentració al sòl entre el primer i segon més, coincidint plenament amb el període de creixement de la vegetació.

En aquest cas, un any després de l'aplicació el recobriment vegetal és superior al de l'any anterior ($p = 0,0001$) i es continuen mantenint les mateixes diferències observades l'any anterior (figura 5.7), amb un percentatge de cobertura vegetal significativament superior en els sòls que ha rebut fangs ($p = 0,0061$). En alguns tractaments s'assoleix una cobertura total, és a dir tots els punts mesurats del transecte tenien algun contacte de vegetació. El valor mitjà pels sòls esmenats és d'un $97,5 \pm 2,7$ %. Aquests resultats coincideixen amb els valors de recobriment determinats a partir de sèries de fotografies digitals (Ojeda et al., 2003), coincidint amb l'últim mostreig al maig del 2002, on ja s'apreciava un major recobriment en els sòls esmenats respecte al sòl control.

S'ha calculat també el percentatge d'espècies introduïdes (sembra de *Dactylis glomerata*, *Lolium perenne* i *Festuca arundinacea*), i no s'han observat diferències significatives, amb valors mitjans del $24,5 \pm 5,5$ % el primer any i del $13,9 \pm 7,4$ % el segon any. El primer any s'observa un domini de *Lolium perenne* entre les espècies sembrades, amb un $61,87 \pm 16,3$ %, seguit de *Dactylis glomerata* que representa el $30,52 \pm 15,5$ %, i molt inferior *Festuca arundinacea* amb un $7,6 \pm 8,3$ % del total del recobriment de les espècies sembrades. Pel que fa a la relació amb el recobriment vegetal, en el segon any disminueix la contribució de les espècies introduïdes i la relació d'abundància de les diferents espècies s'inverteix, de manera que predomina *F.arundinacea* ($51,48 \pm 28,5$ %), seguit de *D.glomerata* ($34,72 \pm 23,2$

%), i *L. perenne*, que representa menys del 8% del total de les sembrades. En les parcel·les control, únicament s'hi ha trobat *F.arundinacea* que representa el $30,52 \pm 15,5$ % del total.

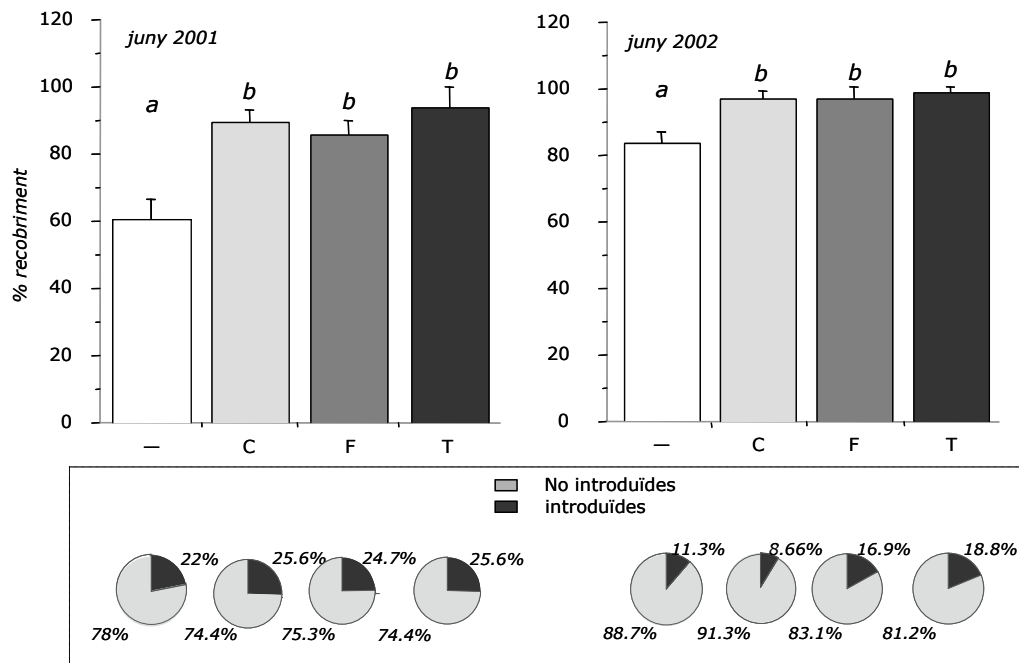


Figura 5.7 Percentatge de recobriment (desviació estàndard) dels diferents tractaments en dos anys consecutius (1 mes i 13 mesos després de l'aplicació) (-=control; c=compostat; f=fresc i t=tèrmic).

Es detalla la contribució de les espècies sembrades respecte del total de la vegetació. N=5. Les lletres indiquen les diferències significatives entre tractaments ($p < 0,05$)

Pel que fa al número d'espècies, no s'ha observat cap diferència entre tractaments (figura 5.8), amb un valor mitjà d'unes 17 espècies per transecte. El segon any, el número d'espècies és lleugerament superior en les parcel·les tractades ($20,6 \pm 2,4$ espècies/transecte) front als controls que no incrementen el nombre d'espècies respecte de l'any anterior ($16,3 \pm 4,3$ espècies/transecte).

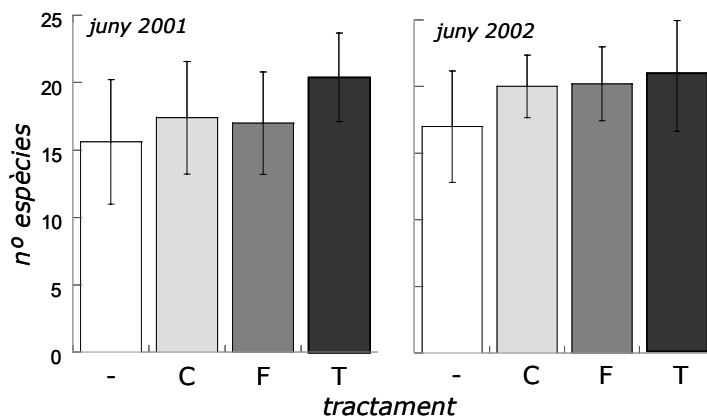


Figura 5.8 N° mig d'espècies per transecte dels diferents tractaments en dos anys consecutius (-=control; c=compostat; f=fresc i t=tèrmic). N=5

A la taula 5.7 s'han representat els percentatges dels diferents grups funcionals de plantes.

Taula 5.7 Mitjana del recobriment (desviació estàndard) dels diferents grups d'espècies respecte el total de la vegetació, en funció dels diferents tractaments (control, fang compostat, fang fresc i tèrmic). N=5

Any	grups	Control	Compostat	Fresc	Tèrmic	p-valor
2001	Llenyoses					
	Arbusts	32,3±15,7	21,9±9,7	17,8±1,8	17,4±6,3	0,0949
	Mates	2,9±4,5	4,8±3,2	8,6±7,8	8,2±6,1	0,4138
	Herbes					
	Gramínies perennes	24,2±9,3	26,6±2,9	25,6±7,2	26,1±6,4	0,9289
	Herbes perennes	10,6±10,6	20,6±6,3	23,4±8,6	26,1±10,1	0,0438*
	Lleguminoses	3,6±5,9	5,9±5,3	3,3±4	5,4±2,9	0,3869
	Anuals	25,4±6,9	23,6±8,3	21,7±9,7	17,7±6,6	0,4456
Ruderals	2,1±2,1	8,9±4,9	11,6±4,3	5,3±3,4	0,0033**	
2002	Llenyoses					
	Arbusts	20,2±5,9	12,4±8,5	10,0±2,5	10,6±3,0	0,1388
	Mates	7,1±5,6	12,5±9,3	10,6±4,9	9,3±9,,1	0,6359
	Herbes					
	Gramínies perennes	11,4±8,7	8,6±5,9	16,9±5,3	18,8±6,0	0,1336
	Herbes perennes	8,5±5,5	20,2±6,2	17,1±10,5	24,4±8,2	0,0199*
	Lleguminoses	8,7±11,1	12,7±8,3	1,7±0,8	5,1±2,8	0,0749
	Anuals	49,3±5,7	42,7±11,9	41,5±10,8	29,9±12,1	0,0585
Ruderals	6,4±2,4	21,1±4,4	34,6±9,4	18,2±4,9	<0,0001***	

* $P<0,05$; ** $P<0,01$; *** $P<0,001$

Dels grups de vegetació establerts, únicament hem trobat diferències significatives en funció del tractament, en l'abundància de les herbes perennes ($p<0,05$) i de les espècies ruderals ($p<0,01$). Pel que fa a les herbes perennes, al primer any hi ha una clara diferència en el recobriment d'aquest grup respecte del total vegetal amb valors molt inferiors als controls (10,6%) que als sòls esmenats (23,3±8,2 %). També incrementa el recobriment les espècies ruderals en els sòls esmenats, amb un percentatge major en les parcel·les que han rebut fang fresc, seguit del compostat, ambdues significativament diferents als controls. Les parcel·les esmenades amb fang tèrmic presenten un recobriment d'espècies ruderals significativament inferior ($p=0,0309$) al dels sòls amb fang fresc, i no es diferencien dels esmenats amb fang compostat i els controls.

Al segon any, el recobriment d'herbes perennes no varia gaire respecte l'any anterior, i únicament hi ha diferències entre els controls i les parcel·les amb fang compostat ($p=0,0159$) i tèrmic ($p=0,0034$), aquestes amb un percentatge molt superior. El recobriment de les plantes ruderals incrementa molt el segon any, sobretot en els sòls esmenats, en tot ells significativament superiors ($p<0,001$). Els sòls esmenats amb fang fresc, són els que presenten un percentatge major de recobriment d'espècies ruderals i significativament diferent al fang compostat ($p=0,0035$) i al tèrmic ($p=0,0006$).

S'han trobat 16 espècies lleguminoses en el total de l'àrea estudiada, les quals representen menys del 6% dels contactes de vegetació el primer any; per tant, és un grup poc representat en la vegetació existent. Al segon any, es produeix un increment del recobriment de lleguminoses en les parcel·les control i les que han rebut fang compostat, que tot i no ser significatiu, representa de l'ordre d'un 50% més en relació a l'any anterior. Tenint en compte que aquestes espècies són fixadores de nitrogen, el fet que únicament incrementi en els sòls no esmenats i en les parcel·les que s'havien adobat amb un fang més estabilitzat, ens podria estar indicant l'avantatge d'aquestes espècies en la colonització d'ambients més pobres en nutrients o, com apunta Casals (2002), una major independència d'aquestes espècies al N, de manera que d'altres factors diferents del de fertilització o de la història regenerativa de l'indret tinguin major rellevància en la progressió d'aquest grup.

Per una banda hi ha un efecte positiu dels fangs, ja que incrementen el percentatge de cobertura de manera significativa. No obstant, en quant a la composició de la vegetació, el grup de les herbàcies perennes és major a les parcel·les esmenades, especialment pel que fa a les espècies ruderals i aquest increment significatiu es manté un any després de l'aplicació del fang. Podem dir, per tant, que els fangs provoquen un efecte directe en la qualitat de la pastura, ja que el percentatge d'herbes ruderals és superior en les parcel·les esmenades. Vasseur *et al.*, (2000), en els seu treball mostren com en els sòls que han estat esmenats amb fangs de depuradora incrementa el percentatge d'herbes ruderals. Molts estudis demostren que les herbes ruderals són més resistents als contaminants del sòl que les plantes autòctones. L'ecologia de les plantes ruderals (germinació ràpida, taxa elevada de creixement, etc.) afavoreix el seu ràpid establiment i una major eficiència que altres espècies (Vasseur *et al.*, 2000). Les gramínies perennes disminueixen molt en relació al primer any, segurament influït per la dallada que es va fer al març del 2002; a més fins al juny va ser una any molt sec i, per tant, la vegetació encara estava poc desenvolupada.

Com ja apuntaven els anteriors resultats, no hi ha diferències en la diversitat específica entre els tractaments (any 2001: $p = 0,1982$; any 2002: $p = 0,8638$). Veure taula 5.8.

Taula 5.8 Diversitat específica (Shannon-Weaver) als sòls de la Vallmitjana dos mesos i un any després de l'aplicació dels fangs.

tractament	any	
	2001	2002
control	$H' = 2,22 \pm 0,4$	$H' = 2,38 \pm 0,3$
Fang compostat	$H' = 2,57 \pm 0,33$	$H' = 2,50 \pm 0,2$
Fang fresc	$H' = 2,47 \pm 0,21$	$H' = 2,50 \pm 0,3$
Fang tèmic	$H' = 2,58 \pm 0,17$	$H' = 2,47 \pm 0,16$

Alguns autors demostren que els fangs de depuradora tenen un efecte negatiu sobre la diversitat de la flora microbiana (Banerjee *et al.* 1997) i les comunitats de microinvertebrats (Andrés, 1999). Pel que fa a la diversitat de plantes superiors, elevats nivells de metalls pesants poden provocar-hi canvis importants (Vasseur *et al.*, 2000). Es podria esperar, per tant, que en els sòls on s'hi ha aplicat els fangs disminuís la diversitat específica degut a la predominància de determinades espècies, sobretot les espècies sembrades. No obstant, en aquest cas els resultats indiquen que els fangs no afecten en la diversitat específica. L'explicació la podem trobar pel fet d'haver aplicat els fangs en superfície, de manera que, en el moment de l'adobat ja hi havia un important banc de llavors d'espècies natives i, per tant, moltes les espècies haurien aprofitat l'entrada de nutrients per créixer. Donat que la màxima disponibilitat de nutrients coincideix amb els mesos de màxim creixement de la vegetació, les plantes s'haurien desenvolupat al mateix temps, de manera que, difícilment hi ha hagut dominància d'unes espècies sobre les altres. S'ha de destacar, l'increment de plantes ruderals a les parcel·les esmenades que s'observa el primer any i s'accentua el segon. Això ens està indicant una certa ruderalització possiblement agreujada pel pasturatge.

A la taula 5.9 es presenta un llistat resumit de les espècies més abundants que s'han trobat al fer els inventaris florístics.

Taula. 5.9 Espècies més abundants en els sòls esmenats amb fang (C, F, T) i el sòl control de la Vallmitjana, l'any 2001 i 2002.

Segons l'escala d'abundància proposada per Braun-Blanquet, 1979: 1= 1 al 10 % ; 2= 10 al 25%; 3= 25 al 50 %; 4= 50 al 75 % i 5 del 75 al 100%. Les caselles buides indiquen absència.

Nom espècie	any 2001				any 2002			
	Control	C	F	T	Control	C	F	T
<i>Aira caryophyllea</i>	1				1			
<i>Andryala integrifolia</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Anthemis triumfetti</i>	1	1	1	1	1		1	1
<i>Avenula pratensis</i>	1				1			
<i>Bromus horderaceus</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Capsella bursa-pastoris</i>		1	1			1	1	
<i>Centaurea pectinata</i>					1	1		1
<i>Cistus salviifolius</i>	2	2	2	2	2	2	2	2
<i>Crucianella angustifolia</i>		1	1	1		1		
<i>Dactylis glomerata</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Dianthus pungens</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Erica scoparia</i>	1	1		1	1			1
<i>Festuca arundinacea</i>		1	1	1		1	1	1
<i>Filago pyramidata</i>	1	1	1	1		1	1	1
<i>Hypochoeris radicata</i>	1	1	1	2	1	1	1	2
<i>Jasonia montana</i>	1	1			1	1		

(continua)

Nom espècie	any 2001				any 2002			
	Control	C	F	T	Control	C	F	T
<i>Lavandula stoechas</i>	1	1			1	1		
<i>Lolium perenne</i>					2	2	2	2
<i>Plantago lanceolata</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Plantago sempervirens</i>			1	1				
<i>Quercus humilis</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Rubus ulmifolius</i>	1	1	1	1			1	1
<i>Sanguisorba minor</i>							1	1
<i>Silene gallica</i>			1	1	1	1		1
<i>Trifolium arvense</i>	1	1	1	1	1	1	1	1

En el Puig, la recuperació del sòl ha consistit en la revegetació d'una zona degradada després de l'abandonament dels conreus. Al primer any no es va poder estudiar la resposta de la vegetació ja que tal com ja s'ha comentat en l'apartat de disseny de l'experiment la sembra es va fer amb retard. Un any després de l'aplicació, al juny del 2002, el recobriment vegetal supera en tots els casos el 70% (figura 5.9). Els sòls control són els que presenten un menor recobriment amb un valor mig del $74,0 \pm 9,6\%$ en front als sòls esmenats on és màxim ($99,1 \pm 1,5\%$). Hi ha per tant una clara diferència entre els sòls control i els sòls que han estat fertilitzats, tal com demostra l'ANOVA d'un factor ($p < 0,0001$). Entre tractaments, tot i presentar un menor recobriment els sòls que han rebut fang compostat ($97,3 \pm 1,2\%$) en comparació als esmenats amb els altres dos tipus (100%), no s'observa cap diferència. L'espècie sembrada dominant és el *L.perenne*, que representa el $52,9 \pm 28\%$ dels contactes, davant un $30,4 \pm 20\%$ per *D.glomerata*. És interessant observar com l'espècie dominant varia en proporció segons es tracti d'un sòl esmenat o no. En el cas dels sòls esmenats les dues espècies apareixen en una proporció semblant, mentre que en els sòls control, el $83,9 \pm 9,6\%$ del recobriment correspon a *L.perenne*. En cap cas s'ha trobat *F.arundinacea*, possiblement perquè el sòl carbonatat no és el millor habitat per aquesta espècie.

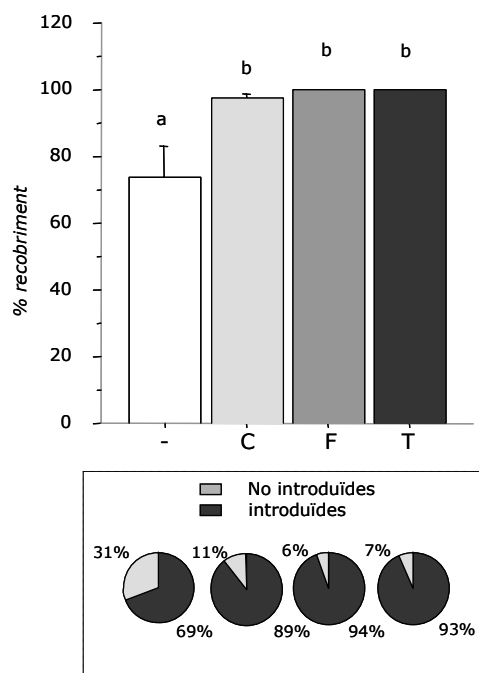


Figura 5.9 Percentatge de recobriment (desviació estàndard) una any després de l'aplicació (juny 2002) a les parcel·les del Puig (1 mes i 13 mesos després de l'aplicació) (-= control; c=compostat; f=fresc i t=tèrmic). Es detalla la contribució de les espècies sembrades respecte del total de la vegetació. N=3

Pel que fa al nombre d'espècies hi ha una notable diferència entre els sòls control i els sòls esmenats ($p=0,0182$). A la figura 5.10 observem que en els sòls no esmenats el número d'espècies és molt superior ($17,0 \pm 3,6$ espècies/transecte), gairebé el doble que a les parcel·les adobades ($8,0 \pm 2,9$ espècies/transecte).

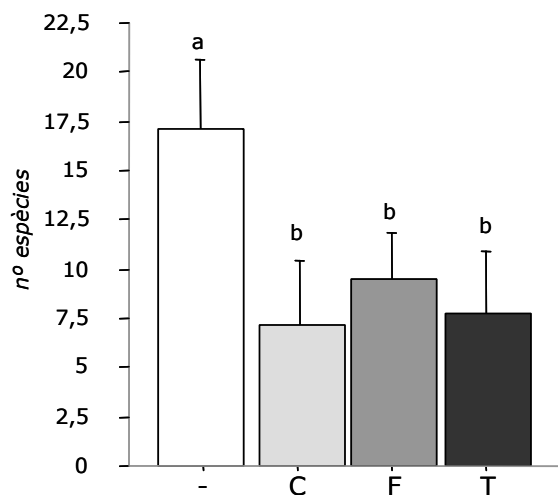


Figura 5.10 Mitjana d'espècies en els diferents tractaments als sòls de El Puig un any després de l'aplicació dels fangs (-= control; C=compostat; F=fresc; T=tèrmic)

A la taula 5.10 es presenten la proporció dels diferents grups funcionals identificats a les parcel·les de El Puig.

Taula 5.10 Mitjana (\pm SD) del percentatge de recobriment (grup funcional/total vegetació) de cada grup funcional en relació al total de la vegetació. N=3

Any	grups	Control	Compostat	Fresc	Tèrmic	p-valor
2002	Llenyoses					
	Arbusts	0,6 \pm 1,05	-	-	-	0,4411
	Herbes					
	Gramínies perennes	69,6 \pm 4,4	89,5 \pm 1,9	94,7 \pm 2,8	93,3 \pm 4,2	<0,0001
	Herbes perennes	5,5 \pm 0,5	2,9 \pm 0,7	1,7 \pm 1,6	3,7 \pm 2,6	0,0959
	Lleguminoses	3,6 \pm 3,3	1,26 \pm 0,02	1,5 \pm 0,8	1,3 \pm 1,2	0,3757
	Anuals	6,1 \pm 2,7	3,8 \pm 2,2	2,0 \pm 0,9	1,5 \pm 1,3	0,0699
	ruderals	13,1 \pm 6,3	7,6 \pm 2,2	3,1 \pm 3,5	4,5 \pm 2,8	0,0620

Com a representant de les plantes llenyoses en aquest sòl només es va trobar l'espècie *R.ulmifolius* en una de les parcel·les control, per aquesta raó el percentatge és inferior a l'1 %. Com era d'esperar, donada la dominància de les espècies sembrades, sobretot *L.perenne* i en segon lloc *D.glomerata*, l'únic grup funcional que ha resultat ser significativament superior ($p \leq 0,0001$) en les parcel·les esmenades respecte als control ha estat el de les gramínies perennes. Els altre grups, que tot i no resultar significatius són més abundants en els sòls control, són de major a menor, el de les plantes anuals amb les espècies *Gallium parisiense*, *Sonchus oleraceus*, *Trifolium arvense*, *Trifolium campestre*, *Trifolium nigrescens*, *Vicia hirsuta* (nitròfila), *Bromus hordeaceus* (ruderal), *Cirsium acarna* (ruderal), *Sisymbrium officinale* (ruderal), *Sonchus oleraceus* (ruderal), *Cirsium arvense* (ruderal), i les herbes perennes com *Echium italicum*, *Convolvulus arvensis* (ruderal), *Cirsium eriophorum* (ruderal), *Cirsium monspessulanum*, *Lactuca serriola* (ruderal), *Verbena officinalis* (ruderal), *Lotus corniculatus*, *Verbascum sinuatum* (herba biennal, nitròfila), *Carlina corymbosa*, *Echium italicum*, *Hieracium tardans* (cf), *Plantago lanceolata*, *Medicago sativa*, *Sanguisorba minor*. És interessant destacar que l'espècie *Verbascum sinuatum*, que sòl viure en sòls eutròfics (Bolòs i Vigo, 1995), només s'ha trobat en els transectes de les parcel·les adobades amb fang fresc. De la família de les lleguminoses, les espècies *Dorycnium pentaphyllum* (mata perenne), *Trifolium arvense* i *T. nigrescens* només han aparegut en els sòls control. Com ja hem apuntat al referint-nos als sòls de la Vallmitjana, aquestes espècies al ser fixadores de nitrogen tenen major avantatge en la colonització d'ambients pobres en aquest nutrient.

Aquests resultats demostren que, un any després de l'aplicació, els fangs aportats al sòl han provocat un significatiu increment en el recobriment vegetal, de més del 90% i un predomini, més del 89%, en la composició florística de dues de les espècies introduïdes (*L.perenne* i *D.glomerata*). A diferència, en els sòls control, el 31% de les espècies no han

estat introduïdes i, per tant, els sòls no esmenats presenten una major riquesa específica. Al aplicar l'índex de diversitat de Shannon-Weaver obtenim de major a menor: $H'_{control} = 1,73 \pm 0,1$; $H'_{f.compostat} = 1,11 \pm 0,1$; $H'_{f.tèrmic} = 1,0 \pm 0,18$; $H'_{f.fresc} = 0,96 \pm 0,2$. Aquests resultats ens indiquen que els fangs de depuradora tendeixen a reduir la riquesa florística ($p=0,0006$) de la comunitat degut a la dominància d'unes espècies sobre altres, en aquest cas de dues de les espècies introduïdes. La disminució de la diversitat en les parcel·les amb fangs és una conseqüència de l'increment de la fertilitat del sòl. D'acord amb Terradas (2001), els sòls molt fèrtils i els sòls infèrtils o tòxics presenten menys diversitat que els sòls poc fèrtils.

A continuació presentem un resum de les espècies més abundants que s'han trobat en els inventaris florístics.

Taula. 5.11 Espècies més abundants en els sòls esmenats amb fang (C, F, T) i el sòl control de El Puig, l'any 2002.

Segons l'escala d'abundància proposada per Braun-Blanquet, 1979: 1= 1 al 10 %; 2= 10 al 25%; 3= 25 al 50 %; 4= 50 al 75 % i 5 del 75 al 100%. Les caselles buides indiquen absència.

Nom espècie	Control	C	F	T
<i>Carlina corymbosa</i>				1
<i>Cirsium acarna</i>	1	1		
<i>Cirsium eriophorum</i>			1	
<i>Coris monspeliensis</i>	1			
<i>Dactylis glomerata</i>	2	4	5	4
<i>Daucus carota</i>		1		
<i>Dorycnium pentaphyllum</i>	1			
<i>Echium italicum</i>	1	1		1
<i>Eryngium campestre</i>	1	1		
<i>Fumana ericoides</i>	1			
<i>Gallium parisiense</i>	1			
<i>Lolium perenne</i>	4	5	5	5
<i>Origanum vulgare</i>		1		
<i>Plantago lanceolata</i>			1	
<i>Reseda lutea</i>	1			
<i>Sanguisorba minor</i>	1			
<i>Sisymbrium officinale</i>		1		
<i>Sonchus oleraceus</i>		1		
<i>Verbascum sinuatum</i>	1		1	1
<i>Verbana officinalis</i>				1
<i>Vicia hirsuta</i>			1	1

5.3.3.3 EL CREIXEMENT DELS ARBRES

A la taula 5.12 es presenten els resultats de l'anàlisi de la variància (ANOVA de mesures repetides) on es compara el creixement relatiu de la variable altura dels arbres.

Taula 5.12 Comparació del creixement relatiu (RGR) de la variable altura de l'arbre, dels roures (*Quercus humilis*) N = 5 parcel·les.

ANOVA de mesures repetides ($p < 0,05$) tenint en compte el tractament (control, fang fresc, fang compostat i fang tèrmic).

Factor	F-valor	p-valor
tractament	3,170	0,0281
temps	87,76	<0,0001
tractament*temps	2,879	0,0105

Com es pot veure amb els resultats de l'ANOVA mesures repetides, els roures tenen un creixement relatiu superior en aquelles parcel·les que han rebut fangs. El primer any, els arbres dels sòls que han rebut fang fresc tenen major creixement relatiu ($27,3 \pm 10,0\%$) que la resta, una mica inferior els roures del sòl amb fang compostat ($22,9 \pm 14,0\%$), i per últim el dels sòls amb fang assecat ($21,5 \pm 9,0\%$) que no presenta diferències en relació al control ($16,4 \pm 6,9\%$). En el capítol 4 de la present tesi, hem observat que en els sòls on s'hi ha aplicat fang fresc, hi ha una producció de nitrogen mineral al final de la primavera (vuitena setmana) molt superior a la dels altres tractaments ($N-NH_4 + N-NO_3 = 54,3 \pm 29,5 \text{ mg Kg}^{-1}$) i això podria explicar que els arbres que han crescut sobre d'aquests sòls hagin disposat de més nutrients en forma de nitrogen mineral o fòsfor. A la figura 5.11 s'observa la tendència que experimenta el creixement relatiu dels roures en els 32 mesos successius a l'aplicació. Pel que fa al creixement relatiu de les alzines, per manca d'exemplars en algun tractament, no s'ha pogut fer l'anàlisi estadística. No obstant, hem volgut representar la tendència que experimenta el seu creixement relatiu.

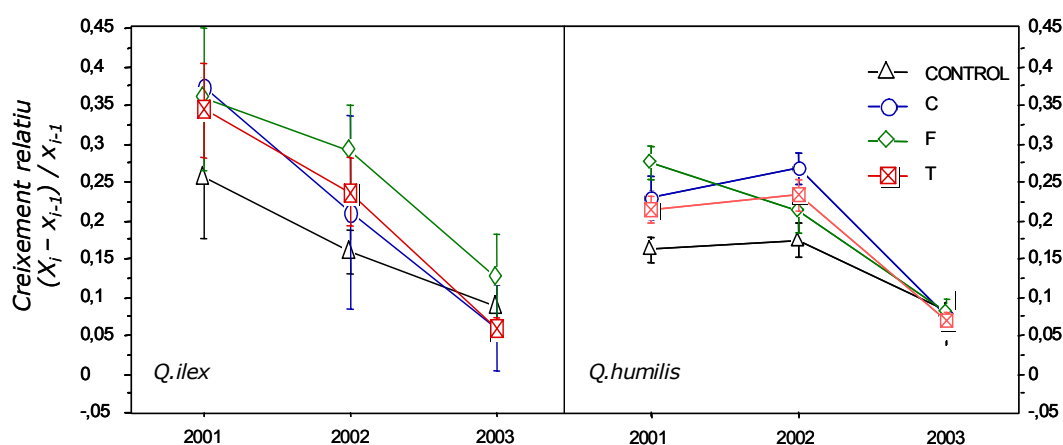


Figura 5.11 Comparació del creixement relatiu en alçada dels arbres (alzines i roures) vuit mesos després de l'aplicació (desembre de 2001), 20 mesos després (desembre 2002) i 32 mesos després (desembre 2003).

Tractament. "–" = control N= 26; "C" = compostat N=30; "F" = deshidratat N=27 i "T" = tèrmic N=34. PLSD ($p < 0,05$)

Tant en les alzines com en els roures, els valors més baixos es produeixen en les parcel·les control. El motiu pel qual les alzines tenen un creixement relatiu mitjà superior als roures es deu a la classe d'edat, ja que la majoria d'alzines tenien una alçada 1,5 metres. Vint mesos després de l'aplicació (desembre 2002), els roures de les parcel·les esmenades segueixen presentant un creixement relatiu superior, sense diferències pel tipus de fang, amb un creixement relatiu mitjà del 23-28%. En valor absolut, equival a un creixement mitjà d'uns 58 ± 21 cm en els arbres de les parcel·les adobades, front als 41 ± 20 cm dels arbres control. Aquest elevat creixement només es pot comprendre si tenim en compte que, en el moment preparar les parcel·les (veure capítol 3) es van eliminar els rebrots, deixant únicament els peus principals i una densitat d'arbres força baixa (292 peus ha^{-1}). És interessant observar que el creixement relatiu dels roures entre el primer i el segon dels sòls amb fang fresc és l'únic que tendeix a disminuir. A partir del segon any de l'aplicació (desembre del 2002), s'observa una tendència decreixent generalitzada en el creixement relatiu en alçada dels arbres, tant d'alzines que ja havia iniciat el primer any, com dels roures. Per una banda la podem atribuir a l'esgotament dels nutrients aportats amb els fangs on, com ja havíem pogut observar al estudiar les propietats biològiques del sòl, al cap d'un any de l'aplicació gairebé han desaparegut els seus efectes. Al haver aplicat una dosi moderada (equivalent a 10 Mg fang sec ha^{-1}) i de manera superficial, els nutrients aportats amb els fangs s'esgoten relativament ràpid, una part absorbits per la vegetació però, també, a causa de les pèrdues per lixiviació. En el capítol 4 hem pogut observar, en el cas del nitrogen, que no tot el que es mineralitza és absorbit per la vegetació. Per altra banda, el fet que es produeixi, també, un creixement inferior a l'any precedent en els arbres control, ens indica que la forta davallada produïda no només es deu a l'esgotament de nutrients esmentat, si no, també a les condicions meteorològiques del segon any (2002-2003). On, una baixa precipitació registrada i temperatures molt altes han causat estrès als arbres i, per tant, s'ha vist afectat el seu creixement. Aquell estiu va ser força sec, amb precipitacions inferiors al 50% de la mitjana climàtica⁷. La temperatura mitjana de l'estiu

⁷ La comparació amb els valors mitjans climàtics (obtinguts a partir de sèries de més de 25 anys de dades) permet definir les zones amb precipitació superior a la mitjana (valors superiors al 100%) o inferior a la mitjana (valors inferiors al 100%).

ha superat entre 1,5 i 3,5 graus la mitjana dels darrers anys a totes les comarques⁸ (SMC, 2003). L'augment de la temperatura provoca un increment de l'evapotranspiració i, per tant, redueix la reserva d'aigua del sòl per a les plantes.

La resposta dels tractaments en relació al diàmetre a 1,30 cm (dbh) únicament ha resultat significativa el primer any, amb un creixement superior dels roures en els sòls adobats amb fang compostat. No obstant, l'anàlisi de la variància (ANOVA de mesures repetides) no ha resultat significativa ($p=0,3401$). Vint mesos després de l'aplicació, igual com s'ha observat en l'alçada dels arbres, els roures dels sòls amb fang fresc i tèrmic, així com els controls, no experimenten cap variació respecte a l'any anterior i els dels sòls amb fang compostat disminueixen igualant-se a la resta de tractaments. El darrer any la resposta ha estat molt baixa i idèntica en tots els tractaments.

Es pot dir, per tant, que hi ha un efecte positiu en les parcel·les adobades. Al primer any els arbres de les parcel·les adobades amb fang van presentar un creixement en alçada superior als controls. Al cap de vint mesos tots els tractaments segueixen superant els controls, no diferenciant-se segons el tipus de fang. Aquest efecte sobre el creixement relatiu, però, desapareix a partir del segon any. Això significa que, en aquest moment, els arbres una mica més grans adobats amb fangs, mostren un creixement en valor absolut major que els arbres més petits (control). És a dir, al final de l'experiment, els arbres presenten un creixement proporcional a la seva mida i, donat que en el primer i segon any els arbres de les parcel·les adobades amb fang havien crescut proporcionalment més, un mateix creixement relatiu representa encara un creixement major en valor absolut.

5.2.4 CONCLUSIONS

L'aplicació de fangs afavoreix un major desenvolupament de la biomassa herbàcia. Aquest efecte és independent del tipus de fangs en el cas del sòl sorrenc. En canvi, sobre el sòl de textura franca, els fangs frescos són els que generen major fitomassa, seguits dels tèrmics i

⁸ en el mes de juny (2003) s'han enregistrat diferències superiors als 4°C respecte de la mitjana dels darrers 10 anys a zones del Priorat, el Segrià, la Segarra, el Garraf, el Vallès Oriental, Osona, el Berguedà i el Ripollès. El juliol hi va haver temperatures mitjanes superiors a tot el país, però amb diferències menors (entre +1.0°C i +2.5°C, aproximadament). Durant l'agost es tornen a obtenir diferències superiors als 4°C a zones del Garraf, el Barcelonès, el Vallès Oriental, Osona i el Berguedà.

els compostats. Aquest efecte també es detecta sobre el recobriment vegetal, ja de per si elevat en tots els tractaments.

L'ús de fangs com a adob pot provocar una certa ruderalització de les àrees estudiades, i, sobre sòls de textura franca, una important reducció de la diversitat de plantes. La proporció d'espècies introduïdes mostra una forta dependència de l'emplaçament (tipus de sòl, ús del sòl, etc.).

L'adobat amb fangs estimula el creixement dels arbres, que és lleugerament superior el primer any.

5.5 REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Andrés, P. 1999. Ecological risks of the use of sewage sludge as fertilizer in soil restoration: effects on the soil microarthropod populations. *Land Degradation and Development*. 10: 67-77
- Arienzo, M.; Adamo, P. & Cozzolino, V. 2003. The potential of *Lolium perenne* for revegetation of contaminated soil from a metallurgical site, *The Science of The Total Environment*, In Press, Corrected Proof, Available online 2 September 2003.
- Banerjee, M.R.; Burton, D.L. & Depoe, S. 1997. Impact of sewage sludge application on soil biological characteristics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 66: 241-249.
- Bolòs, O, Vigo, J, Masalles, RM i Ninot, JM. 1990. *Flora Manual dels Països Catalans*. Pòrtic. Barcelona.
- Bolòs, O. i Vigo, J. 1995. *Flora dels Països Catalans*. (III). Ed. Barcino. Barcelona.
- Braun-Blanquet, J. 1979. *Fitosociologia: bases para el estudio de la comunidades vegetales*. Blume Ed. Madrid.
- Bruinsma, J. 1963. The quantitative analysis of chlorophyll a and b in plant extracts. *Photochemistry and Photobiology*. 2: 241-249
- Cano, A.; Navia, R.; Amezaga, & Montalvo, J. 2002. Local topoclimate effect on short-term cutope reclamation success. *Ecological engineering*. 18 (4):489-498.
- Casals, P; 2002. *Estratègies de la vegetació mediterrània en l'ús de nitrogen després del foc*. Tesis Doctoral. Departament de Biologia Vegetal. Unitat de Biologia Vegetal. Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona.
- Cheung, K. C ; Wong, J. P. K.; Zhang, Z. Q. ; Wong, J. W. C. & Wong, M. H. 2000. Revegetation of lagoon ash using the legume species *Acacia auriculiformis* and *Leucaena leucocephala*, *Environmental Pollution*, 109: 75-82
- DoE, 1986. *Landfilling wastes*. Waste management paper No. 26, Department of the Environment, HMSO, London.
- Fresquez, P.R.; Francis, R.E. & Dennis, G.L. 1990. Sewage sludge on soil and plant quality in a degraded, semiarid Grassland. *J. Environ. Qual.* 19: 324-329.
- Global Crop Protection Federation (GCPF). 2000. *A comparative Review of Terrestrial (non-target) Plant test Methods*. Background document.
- Gounot, M; 1969. *Méthodes d'étude quantitative de la végétation*. Masson. Paris.
- Guerrero, C.; Gómez, I.; Moral, R.; Mataix-Soler, J.; Mataix-Beneyto, J. & Hernández, T. 2000. Reclamation of a burned forest soil with municipal vegetation cover recovery. *Bioresource Technology*. 76: 221-227.
- Henry, Ch. L.; Cole, D.W. & Harrison, R.B. 1993. Use of municipal sludge to restore and improve site productivity in forestry: The Pack Forest Sludge Research program. *Forest Ecology and Management*. 66: 137-149.
- International Seed Testin Association. 1999. *International Rules for seed testing*. Seed Sci & Technol.

- 27, supplement.
- Jaynes, W. F.; Zartman, R. E.; Sosebee, R. E. & Wester, D. B. 2003. Biosolids Decomposition after Surface Applications in West Texa. *J. Environ. Qual.* 32:1773–1781.
- Marx, D. H.; Berry, C. R. & Kormanik, P. P. 1995. Application of Municipal Sewage Sludge to Forest and Degraded Land. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 677
- Navas, A.; Machín, J. & Navas, B. 1999. Use of biosolids to restore the natural vegetation cover on degraded soils in the badlands of Zaragoza (NE Spain). *Bioresource Technology.* 69: 199-205.
- Jorba, M. & Andrés. P. 2000. Effects of Sewage Sludge on the Establishment of the Herbaceous Ground Cover after Soil Restoration. *Journal of Soil and Water Conservation,* 55 (3)
- Juvonen, R.; Martikainen, E.; Schultz, E.; Joutti, A.; Ahtiainen, J. & Lehtokari, M. 2000. A Battery of Toxicity Tests as Indicators of Decontamination in Composting Oily Waste, *Ecotoxicology and Environmental Safety,* 47 (2) : 156-166
- Lichtenthaler, Harmut K., & Wellburn, Alan R., 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents: *Biochemical Society Transactions,* v. 11, p. 591- 592
- Margalef, R. 1977. *Ecología.* Ed. Omega. Barcelona
- Mbagwu, J. S. C. 1989. Effects of organic amendments on some physical properties of a tropical ultisol. *Biological Wastes,* Volume 28, Issue 1, 1989, Pages 1-13
- Moorby, J. & Besford, R.T. 1983. Mineral nutrition and growth. p. 481-529. In Lauchi, A. & Bielecki, R.L. (ed.). *Inorganic plant nutriion.* Encyclopedia of Plant Physiology New series Vol 15B. Springer-Verlag, Berlin.
- OECD Guideline for testing of Chemicals 298. 1984. *Terrestrial Plants, Growth Test.*
- Ojeda, G.; Alcañiz, J.M. & Ortiz, O. 2003. Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge. *Land Degradation & Development.* 14: 563-573
- SMC. 2003. Dades de l'any pluviomètric 2002-2003 a Catalunya. Nota de premsa. http://www.mediambient.gencat.net/cat/el_departament/sala_de_premsa/notes/NP_030915_a_ny_pluviom_tric.jsp.
- Sooper, W.E. 1992. Reclamation of mine land using municipal sewage sludge. In: Lal, R., Stewart, B.A. (Eds.), *Soil restoration,* vol.17. Springer-Verlag. NY, pp. 351-431
- Sort X, Alcañiz JM. 1999. Effects of sewage sludge amendment on soil aggregation. *Land Degradation & Development* 10:3-12
- Tate, R.J. 1987. *Soil organic matter. Biological and ecological effects.* John Wiley & Sons. NY
- Terradas, J. 2001. *Ecología de la Vegetación de: de la ecofisiología de las plantas a la dinámica de comunidades y paisajes.* Ediciones Omega. Barcelona
- Vasseur, L. Cloutier, C. & Anseau. 2000. Effects of repeated sewage sludge application on plant community diversity and structure under agricultural field conditions on Podzolic soils in eastern Quebec. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 81: 209-216.
- Walter, I.; Cuevas, G.; García, S. & Martínez. 2000. Biosolid effects on soil and native plant production in a degraded ecosystem in central Spain. *Waste Management Resource.* 18: 259-263.
- Wang, W. 1991. Higher plants (common duckweed, lettuce and rice) for effluent toxicity assessment. In *Plants for Toxicity Assessment: Second Volume* (J. W. Gorsuch; W. R. Lower; W.

Wang & M. A. Lewis, Eds.), ASTM STP 1115, pp. 68-76. ASTM, Philadelph

CAPÍTOL 6

**ANÀLISI MULTICRITERI DE DIFERENTS PRÀCTIQUES DE FERTILITZACIÓ AMB FANGS EN
L'ÀMBIT FORESTAL**

6.1 INTRODUCCIÓ

En aquest capítol pretenem comparar diferents alternatives d'ús / gestió de fangs de depuradora emprats per a la recuperació de sòls forestals degradats per tal d'ajudar en les preses de decisions.

L'avaluació de les diferents alternatives de fertilització utilitzades en aquesta tesi per a la recuperació de sòls degradats, s'ha dut a terme amb l'anàlisi multicriteri. Aquest mètode ens permet fer la comparació de les alternatives en base a una sèrie de criteris.

Els mètodes d'anàlisi multicriteri estan pensats per donar respostes a qüestions on la complexitat del sistema real en anàlisi no es pot avaluar sense contextualitzar-les en la seva multidimensinalitat (ecològica, econòmica i social). Aquests mètodes procuren considerar de manera simultània els múltiples criteris en conflicte. El terme criteri, en un context de presa de decisions, implica algun tipus d'indicador pel qual una decisió (alternativa) o acció en curs pot ser jutjada com a més desitjable que una altra (Belton i Stewart, 2002). La presa de decisions ambientals normalment involucra interessos que competeixen entre ells, diferents grups, objectius i diferent informació (Janssen i Munda, 1998).

El principal avantatge dels models multicriteri és que poden considerar un elevat nombre de dades, relacions i objectius (multiobjectiu) que generalment estan presents en un problema real de decisió específica, de manera que el problema pot ser estudiat d'una forma multidimensional (Martinez Allier *et al.*, 1998). D'altra banda, aquests mètodes ens permeten resoldre el problema derivat de la incertesa que es produeix per diferents raons. Cal diferenciar la incertesa interna, relacionada amb el procés d'estructuració del problema i la seva anàlisi, de l'externa, que té a veure amb la pròpia naturalesa de l'ambient i les conseqüències d'aquest (Belton i Stewart, 2002). Pel que fa al primer tipus, podem distingir entre la incertesa de tipus estocàstica, és a dir aquella relacionada amb el futur i que fa difícil la predicció del que succeirà, de la incertesa *fuzzy* que es produeix quan la incertesa no té a veure amb que es produeixi o no un esdeveniment, sinó en la descripció del mateix, és a dir, tot i conèixer i observar el problema, som incapaços de descriure'l.

En el moment de prendre una decisió hem de fer un balanç de múltiples factors (ex. criteris, en el sentit expressat anteriorment). La veritable naturalesa dels problemes multicriteri és que moltes vegades, com ja hem dit anteriorment, la informació de natura complexa i conflictiva

sovint reflexa diversos punts de vista i, que aquesta canvia sovint en el temps (Belton i Stewart, 2002). Aquest aspecte és fonamental ja que en el moment de proposar un pla d'actuació, o arribar a un compromís sobre quina de les alternatives és la més favorable, s'ha de tenir en compte que hi ha diversos interessos i sistemes de valor en joc. Això pot implicar divergències a l'hora de considerar els criteris i les alternatives entre les quals escollir i, per tant, depenent de la visió / interpretació del problema pot donar resultats diferents. En general, en un problema multicriteri no s'arriba a una solució òptima si no més aviat a una solució de compromís (Munda, 1998).

Les decisions multicriteri son una eina adequada en avaluacions empíriques de projectes i bens públics ja que té en compte un rang ampli de criteris d'avaluació (Munda, 1998). També ha estat demostrada la seva utilitat en moltes polítiques ambientals i problemes de gestió. Espelta *et al.*, (2003) apliquen aquest tipus d'anàlisi en el seu treball d'àmbit forestal i destaquen la valuosa aportació d'aquestes eines de suport a la presa de decisions en programes de restauració.

En el cas estudiat la gran heterogeneïtat de la informació disponible (quantitativa i qualitativa), els diferents tipus i graus d'incertesa (atribució del pes a cada criteri i establir els llindars de indiferència) d'aquesta, els objectius diferents i en conflicte (per exemple: "obtenir una millora de les propietats del sòl, minimitzant els impactes negatius i a un cost mínim"), justifica la utilització de l'anàlisi multicriteri, per tal de donar resposta al problema plantejat. Es a dir, quina de les pràctiques de fertilització emprades pot ser la més adequada i, de quina manera com a investigadors podem ajudar en les preses de decisions futures, relacionades en aquest cas amb l'aplicació dels fangs de depuradora.

6.2 MATERIAL I MÈTODES

Donada la incertesa a l'hora d'atribuir un pes a cada criteri, hem aplicat el mètode qualitatiu d'anàlisi multicriteri *Regime* (Hinloopen *et al.*, 1983) per tal d'avaluar les diferents alternatives en examen. Seguidament, per contrastar els resultats obtinguts amb aquesta anàlisi i poder evidenciar les diferències rellevants entre les alternatives a l'hora d'assignar llindars a cada criteri, hem utilitzat el procediment d'agregació del mètode NAIADE -*Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments*- (Munda, 1995).

En general en un procés d'Avaluació de Decisions Multi criteri (MCDE) es reconeixen tres fases fonamentals:

6.2.1 IDENTIFICACIÓ I ESTRUCTURACIÓ DEL PROBLEMA

Per tal d'establir un rang d'alternatives que ens permeti identificar la pràctica de fertilització més adequada, tenint en compte que haurà de maximitzar els impactes ecològics positius, minimitzar els costos econòmics, els efectes molestos a nivell social (mala olor) i els impactes sobre medi ambient i la salut, el primer pas del procés és la construcció de la matriu d'impacte (criteris / alternatives).

Donat el conjunt I (alternatives) i J (criteris d'avaluació considerats) i assumint l'existència de i alternatives ($i=1\dots I$) i j criteris ($j=1\dots J$), es pot construir una matriu \mathbf{P} de valors $p_{i,j}$ anomenada matriu d'impacte. Aquesta matriu pot incloure informació quantitativa, qualitativa o ambdós tipus (Munda, 1998).

S'assignen valors a cada criteri per a cada una de les alternatives. En aquest treball es consideraran els següents elements:

Alternatives: es tracta de les opcions que representen les eleccions possibles que ens permeten respondre al problema plantejat.

En el cas estudiat s'ha decidit considerar 4 alternatives: (1) no fertilitzar (control); fertilitzar amb fang (2) fresc; (3) compostat; (4) de secatge tèrmic. Per tal de donar resposta a la pregunta plantejada anteriorment, sobre quina de les alternatives pot resultar més adequada, en aquest anàlisi, tot i ser conscients que sense fertilitzar no es pot transformar una brolla en devesa (La Vallmitajna), i/o recuperar una àrea degradada com a resultat de l'abandó de conreus (El Puig), hem considerat oportú incloure en aquesta anàlisi la opció no fer res, és a

dir avaluar també en base als mateixos criteris l'impacte en la recuperació del sòl que representa no intervenir-hi, que equival al sòl control de cada una de les zones intervingudes. Pel que fa a les altres alternatives, es tracta dels tres tipus de fertilització estudiats i comparats en aquest treball.

Dimensions afectades: en l'estructuració d'un problema real específic, existeix una multidimensionalitat en la descripció de la complexitat del sistema. Un punt bàsic de les anàlisi multicriteri socials –SMCE- és que en la societat hi ha diferents valors i punts de vista legítims. A la figura 6.1, es sintetitza de manera gràfica les reflexions plantejades. D'aquí sorgeix la qüestió, - quin pes atribuir a cada criteri i com?- Per tal de respondre a aquesta pregunta s'ha d'acceptar un principi bàsic: atribuir un pes als diferents criteris implica ponderar-les diferents dimensions i, tècnicament resulta molt complicat. La solució més pràctica és no posar cap pes. Aquesta opció, molt probablement redueix conflictes a l'hora d'estructurar el problema, però, és correcte? L'altra possibilitat és assignar el mateix pes a tots els criteris, però depenent del nombre de criteris de cada dimensió pot succeir que els diferents objectius, dimensions, tinguin diferent pes. Únicament es podria evitar en cas que totes les dimensions tinguessin el mateix nombre de criteris. Donat que atribuir el mateix nombre de criteris a cada dimensió pot esdevenir redundat, la millor solució pot ser donar el mateix pes a cada dimensió i repartir-los proporcionalment entre els criteris de cada una d'elles. (Munda, 2003)

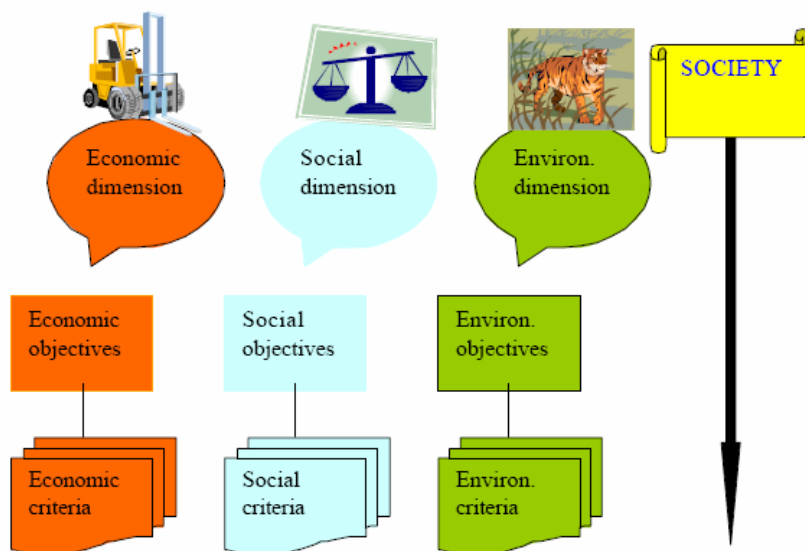


Figura 6.1. Visió esquematitzada de l'estructura jeràrquica d'un problema afectat per les tres dimensions esmentades. (Munda, 2003)

En el nostre cas, dins de cada una de les dimensions, s'han triat els següents criteris:

- Dimensió ecològica

(1) *carboni microbià / carboni orgànic*: la biomassa microbiana del sòl afecta o condiciona la majoria de les propietats edàfiques que es relacionen amb la fertilitat del sòl (Elliott, et al 1996), al mateix temps es pot considerar com un indicador de la qualitat del sòl més sensible que la pròpia matèria orgànica o el carboni orgànic, ja que respon més ràpidament i en major grau als canvis que es produeixen, com per exemple, deguts a la degradació del sòl (Ross et al., 1982; Powlson et al., 1987). Els següents rangs (0- 1% crític; 2 – 4% acceptable; > 4% òptim) proposats per Milton et al., (1984), ens han servit per establir els llindars d'indiferència en el mètode d'agregació NAIADÉ i establir l'ordre de prioritats en el mètode Regime.

(2) *la producció de nitrats*: L'alt contingut de nitrogen en la matèria orgànica dels fangs (Sommers, 1977; Werther i Ogada, 1997) converteix aquests productes en un bon fertilitzant nitrogenat (Bernal et al.; 1998). No obstant, a partir de certs nivells passa a ser problemàtic pel risc potencial que representen les pèrdues per lixiviació. La Directiva de Nitrats (Council Directive 91/676/ECC) limita l'ús de nitrogen en fertilitzants minerals i orgànics a $170 \text{ K N ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$ en àrees qualificades com a vulnerables (ZNV).

(3) *creixement dels arbres*; (4) *producció de biomassa herbàcia*; (5) *percentatge de plantes ruderals o la diversitat específica (índex Shannon-Weaver)*. La resposta de la vegetació pot ser un bon indicador per avaluar els efectes dels fangs a mig-llarg termini i, per tant, valorar la sostenibilitat d'aquestes pràctiques en condicions naturals.

□ Dimensió econòmica.

Costos econòmics (cost de producció, transport i aplicació). Per manca d'informació no s'ha pogut fer un balanç de cost / benefici i, per tant, ens hem hagut de limitar al cost que suposa cada alternativa.

Cost estimat (€ ha^{-1}) suposant que no es cobren els fangs. És a dir, únicament s'ha comptat el cost de transport (s'ha considerat una distància mitjana de 60 Km, des de la depuradora a la zona d'aplicació) i d'aplicació.

Si s'hagués d'assumir el cost de producció, representaria, en el cas del fang fresc i assecat tèrmicament que no es cobraria res, per tant 0. Pel que fa al fang compostat es cobraria 15 €/Tona de fang compostat.

L'alternativa de portar els fangs a l'abocador representaria pagar un cànon de 30 €/Tona de fang.

En aquest cas considerem el cost social (cost de producció + cost de transport + cost d'aplicació) per tal de valorar quina alternativa des d'un punt de vista econòmic resulta la

menys costosa. Pel que fa a l'alternativa, no fer res, hem cregut oportú incloure el cost que representa portar els fangs al abocador ja que si no es valoritza aquest residu s'haurà de pagar el cànon establert i, per tant, representa una despesa social, inclosa actualment dins l'impost de l'aigua.

En la construcció de la matriu, segons les consideracions dels propietaris dels terrenys a restaurar, únicament s'ha considerat el cost d'aplicació, ja que el preu de transport no l'assumiria el propietari.

□ Dimensió social

La *mala olor* que desprenen els fangs no tractats, resultat de la putrefacció anaeròbia del substrat orgànic (Burton i Sneath, 2001), ha estat considerada en aquest anàlisi ja que tots els actors socials consultats consideren que resulta molt molesta. A més, les males olors dels fangs estan considerades com un dels impactes negatius de la seva aplicació, com ho demostra les protestes d'associacions locals en contra les olors dels fangs aplicats al sòl (European Communities, 2001) Els fangs després de ser tractats (desinfecció i/o estabilització) redueix les olors ofensives (DNRE, 1998).

Com ja hem dit anteriorment, cada dimensió, i per tant cada criteri, podria tenir assignat un pes d'importància. La qüestió dels pesos és molt delicada i no sempre aquests són unívocament identificables (Hinloopen *et al.*, 1983). Evidentment quan aquests estan associats a intensitats de preferència (com a importància relativa dels criteris) adopten una funció compensatòria entre els criteris (*trade-off*) i és molt difícil de gestionar (Belton i Stewart, 2002).

Dades disponibles

L'escala de mesura dels diferents atributs pot ser qualitativa (escala ordinal, sense expressió d'intensitats) o quantitativa (interval). Molts problemes ambientals inclouen una mescla d'informació quantitativa i qualitativa (Janssen i Munda, 1998). A més aquesta pot ser expressada de forma lingüística, *crisp* (numèrica), *fuzzy*, estocàstica. L'avantatge dels mètodes d'anàlisi multicriteri es que poden processar informació de naturalesa diferent. En el nostre cas, el quocient C-mic/C-Org, la producció de nitrats, el creixement dels roures, la producció de biomassa herbàcia, el percentatge de plantes ruderals i el cost econòmic són criteris numèrics. Pel criteri olor, de tipus qualitatiu, s'ha emprat una expressió lingüística. D'acord amb Espelta *et al.* (2003), atès que és impossible definir de manera realista els llindars de la diversitat específica (índex Shannon-Weaver), hem usat una expressió lingüística de 3 graus (alta, normal, baixa).

També els mètodes multicriteri resolen els problemes d'incomparabilitat de paràmetres amb unitats de mesura diferents, com per exemple, en el nostre cas la producció de nitrats ($\text{mg Kg}^{-1} \text{N-NO}_3$) versus el cost econòmic (euros ha^{-1}), etc.

En l'anàlisi de les alternatives hem d'assignar una direcció a cada indicador (criteri). En el cas estudiat, l'impacte del cost econòmic i el percentatge de plantes ruderals s'ha de minimitzar, mentre que el dels altres criteris s'ha de maximitzar.

A les taules 1 i 2 es presenten les matrius d'impacte. Hem volgut estudiar per separat les dues zones (La Vallmitjana i El Puig) donades les característiques diferents (ús del sòl, textura, etc.) que presenten (capítol 1 i 3). La taula 3, correspon a la matriu d'impacte, construïda segons els criteris que consideren els propietaris del terreny a restaurar, fruit de la informació obtinguda en les entrevistes.

Actors:

les persones involucrades / afectades en la valorització dels fangs de depuradora representen tots els àmbits socials. Per aquesta raó és important no limitar-nos a un únic punt de vista, en el nostre cas ecològic, i provar d'evidenciar la posició dels principals actors socials. En l'estudi presentat per la Comissió Europea (European Communities, 2001), fan un anàlisi per països dels diferents posicions, a favor i en contra, que tenen dels principals actors socials sobre l'ús dels fangs de depuradora. El mateix estudi revela com els diferents actors socials (grangers, propietaris de finques, indústria agroalimentària, comerciants d'aliments, companyies de tractament d'aigües residuals, gestores de residus urbans, poblacions, autoritats governatives i les associacions de consumidors) tenen interessos i percepcions diversos. No obstant, també destaca que les principals àrees de consens sobre les estratègies a seguir en relació a l'aplicació i reciclatge dels fangs són: (i) els fangs de depuradora han de ser tractats de manera que el cost ambiental i econòmic sigui el mínim possible; (ii) en relació als impactes potencials sobre la salut humana i l'ambient, tots els actors socials reclamen més investigació per tal d'augmentar la confiança en el seu ús.

Una bona anàlisi multicriteri hauria de poder comptar amb la intervenció del màxim nombre d'actors socials implicats. En el nostre cas, podem pensar en quatre tipus d'actors: (i) representants de les autoritats administratives, interessats en trobar una sortida al problema dels fangs; (ii) tècnics / investigadors, responsables en demostrar la viabilitat d'aquests residus; (iii) grangers, pagesos o propietaris de finques; (iv) habitants de zones properes a les àrees afectades per aquestes pràctiques. Aquest hauria de ser l'escenari ideal però, per les pròpies limitacions de l'estudi, donat que en un inici aquest aspecte no s'havia plantejat com a objectiu, únicament podem fer una anàlisi segons dos punts de vista, el del tècnic /investigador i el del propietari dels terrenys a restaurar.

A les taules 6.1, 6.2, 6.3 es presenten els valors utilitzats per la construcció de la matriu d'impacte. Pel quocient C-mic/C-Org s'ha emprat el valor mig dels dos primers mesos després de l'aplicació; pel nitrogen s'ha utilitzat la concentració màxima detectada al sòl; el creixement dels arbres, la producció de biomassa herbàcia i el percentatge de plantes ruderals correspon al valor mitjà un any després de l'aplicació. D'acord amb Espelta *et al.*, (2003) donat que és impossible definir de manera realista els llistats de la diversitat específica, hem usat una expressió lingüística de 3 graus (alt, normal, baix); El cost econòmic, s'ha establert d'acord a la informació detallada a l'informe Ecofangs (2003); finalment per estimar els problemes de l'olor s'han triat tres categories, molt bona pel sòl control, més o menys bona pels fangs compostat i tèrmic i dolenta pel fang fresc.

Taula 6.1. Matriu d'impacte (criteris × alternatives) per a l'avaluació. Zona A: La Vallmitjana (zona forestal cremada)

Criteri	tipus	unitat	tendència	No fer res	Fang F	Fang C	Fang T
C-mic /C-Org	crisp	%	↑	1,7	1,9	2,2	1,9
N-NO3	crisp	Kg ha ⁻¹	↑	2,8	47,1	29,8	28,4
Creixement	crisp	cm	↑	34	46	57	58
biomassa herbàcia	crisp	g m ⁻²	↑	173	278	273	278
plantas ruderals	crisp	%	↓	6,3	34,6	21,0	18,2
Cost econòmic	crisp	€ ha ⁻¹	↓	479	2158	1260	738
Olor	lingüístic		↑	molt bona	dolenta	± bona	± bona

Taula 6.2. Matriu d'impacte (criteris × alternatives) per a l'avaluació. Zona b: El Puig (camp abandonat)

Criteri	tipus	unitat	tendència	No fer res	Fang F	Fang C	Fang T
C-mic /C-Org	crisp	%	↑	1,8	2,5	2,3	2,3
N-NO3	crisp	Kg ha ⁻¹	↑	18,8	157,6	55,4	127,7
biomassa herbàcia	crisp	g m ⁻²	↑	125	256	239	266
H- Shannon-Weaver	lingüístic		↑	normal	baix	baix	baix
Cost econòmic	crisp	€ ha ⁻¹	↓	479	2158	1260	738
Olor	lingüístic		↑	molt bona	dolenta	± bona	± bona

Taula 6.3. Matriu (criteris × alternatives) d'impacte elaborada segons els criteris proposats pels propietaris dels terrenys a restaurar: a partir de la informació recollida en entrevistes

Criteri	tipus	unitat	tendència	No fer res	Fang F	Fang C	Fang T
Recobriments vegetals	crisp	%	↑	58	71	80	73
biomassa herbàcia	crisp	g m ⁻²	↑	174	278	274	278
Creixement roures	crisp	cm	↑	34	46	57	58
Cost econòmic	crisp	€ ha ⁻¹	↓		958	258	258
olor	lingüístic		↑	molt bona	dolenta	± bona	± bona

6.2.1 CONSTRUCCIÓ I APLICACIÓ DEL PROCEDIMENT D'ANÀLISI I D'AGREGACIÓ

6.2.2.1 MÈTODE REGIME:

L'anàlisi Regime és un mètode d'anàlisi multicriteri relativament simple i matemàticament molt consistent que es basa en la combinació del mètode de comparació a parelles Kendall's per dades ordinals i anàlisi *logit* (Hinloopen *et al.*, 1983).

El primer pas és obtenir, a partir de la matriu d'impacte (*critèris × alternatives*) (taules 6.1, 6.2, 6.3), una matriu en escala ordinal (taula 6.1', 6.2', 6.3'), assignant un valor que va d'1 a 4 segons vagi de pitjor a millor.

Taula 6.1'. Matriu (critèris × alternatives) en escala ordinal. Zona A: La Vallmitjana (zona forestal cremada)

Pes (λ)	Criteris	alternatives			
		No fer res	Fang F	Fang C	Fang T
0,1	C-mic /C-Org	1	2	3	2
0,1	N-NO3	1	3	2	2
0,1	Creixement	1	2	3	3
0,1	biomassa herbàcia	1	2	2	2
0,1	plantes ruderals	3	1	2	2
0,25	Cost econòmic	4	1	2	3
0,25	olor	3	1	2	2

Taula 6.2'. Matriu (critèris × alternatives) en escala ordinal. Zona b: El Puig (camp abandonat)

Pes (λ)	Criteris	alternatives			
		No fer res	Fang F	Fang C	Fang T
0,125	C-mic /C-Org	1	2	2	2
0,125	N-NO3	1	4	2	3
0,125	biomassa herbàcia	1	2	2	2
0,125	H- Shannon-Weaver	2	1	1	1
0,25	Costos econòmics	4	1	2	3
0,25	olor	3	1	2	2

Taula 6.3'. Matriu (critèris × alternatives) en escala ordinal elaborada segons els criteris proposats pels propietaris dels terrenys a restaurar: a partir de la informació recollida en entrevistes

Pes (λ)	Criteris	alternatives			
		No fer res	Fang F	Fang C	Fang T
0,16	Recobriments vegetal	1	2	2	2
0,16	biomassa herbàcia	1	2	2	2
0,16	Creixement roures	1	2	3	3
0,25	Costos econòmics	3	1	2	2
0,25	olor	3	1	2	2

Aquesta anàlisi utilitza informació (els valors atribuïts a cada criteri i pesos assignats) de tipus ordinal. Això dona consistència al mètode ja que estem segurs que el pes és importància.

En primer lloc, es treballa sobre les diferències entre els impactes de les alternatives, és a dir, per cada criteri es fa una comparació per parelles de totes les alternatives. A la millor alternativa se li assigna +1, a la pitjor -1 i 0 en cas que les dues alternatives siguin iguals.

Si es consideren dues alternatives (*i, i'*) i s'assigna per cada criteri (*j*):

$$+1 \quad \text{si} \quad p_{i,j} > p_{i',j} \quad -1 \quad \text{si} \quad p_{i,j} < p_{i',j} \quad 0 \quad \text{si} \quad p_{i,j} = p_{i',j}$$

D'aquesta manera per tots els criteris $j = 1 \dots J$ podem construir un vector Regime

$$r_{i,i'} = (r_{i,i',1}, \dots, r_{i,i',j})$$

i per totes les alternatives calculem la corresponent matriu Regime (**R**) (doble i especular ja que considera $r_{ij}' = -r_{ji}$). En aquesta transformació no es perd cap informació en relació a la matriu d'impacte.

En general, considerant un vector de pesos $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_j)$, on assumim que:

$$(1) \quad \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \lambda_4 \geq \dots \geq \lambda_j > 0$$

$$\sum_j \lambda_j = 1$$

D'aquesta manera, podem calcular un índex $\mu_{ii'}$, per les diferències en funció de quina és millor que l'altra. On:

$$\mu_{ii'} = \sum_j \lambda_j r_{ii',j}$$

En el nostre cas hem considerat únicament la possibilitat de no donar cap pes, és a dir assignar a cada criteri el mateix λ , o donar un pes (importància) equitatiu (n° cardinal) per cada dimensió. En el nostre cas, donada la rellevància de la dimensió ecològica, hem assignat el 50 % del pes a aquesta dimensió, amb una repartició equitativa dels pesos de cada criteri que la conformen (taules 6.1', 6.2', 6.3').

En general, quan la informació associada als pesos es únicament ordinal, pot donar-se el cas d'un Regime crític, dit així perquè no es pot donar una conclusió definitiva sobre el signe de l'índex μ (ex. $\mu_{ii'} > 0 =$ preferent). La principal idea de l'anàlisi Regime és resoldre aquesta dificultat dividint el conjunt de pesos possibles (S , políedre convex) en subconjunts dels quals es pugui definir el signe de l'índex μ .

Assumint tenir L equacions crítiques

$$(2) \quad f_l(\lambda) = \sum_j r_{lj} \lambda_j = 0 \quad \text{on } l = 1, \dots, L$$

es poden generar fins a 2^L subconjunts potencials:

$$(3) \quad S_1 = S \cap f_1(\lambda) > 0, f_2(\lambda) > 0, \dots, f_L(\lambda) > 0;$$

$$S_2 = S \cap f_1(\lambda) > 0, f_2(\lambda) > 0, \dots, f_L(\lambda) < 0; \quad \text{etc.}$$

Els punts extrems de cada subconjunt ($M \leq 2^L$ políedres convexes), es poden generar amb algoritmes apropiats que considerin (2) i (3). Els subconjunts no tenen la mateixa dimensió. Un cop coneguts els punts extrems, assumint que els pesos es distribueixen uniformement en S , la dimensió relativa de cada subconjunt es pot trobar calculant la integral de cada un en relació a la del conjunt S . Aquest tipus de càlcul no es pot fer analíticament. Per tal de resoldre-ho s'acostuma a utilitzar el model de càlcul Montecarlo. Aquest resultat ens calcula la probabilitat que $\lambda \in S_1, S_2, \dots, S_m$. En el nostre cas, s'han fet servir les taules ja existents i calculades que subministren els punts extrems i la probabilitat dels diferents subconjunts.

Per cada subconjunt de S és possible indicar sense ambigüïtat el signe de l'índex μ_{ij} per a cada parella d'alternatives. D'aquesta manera podem construir les matrius de comparació en parella (V) amb elements iguals a $+1$ o -1 , i amb 0 a la diagonal principal. (El número de matrius de comparació equival al número de subconjunts possibles).

Un cop construïdes les matrius de comparació en parella (V) i coneixent la probabilitat de cada subconjunt de pesos (S_1, S_2, \dots, S_m) es pot construir una matriu de freqüència de classificació (*ranking*) final per cada alternativa (ex. per l'alternativa 1 es sumen les vegades que ha guanyat en la comparació a parella, considerant el subconjunt de pesos possibles S_1, S_2, \dots, S_m , cada una multiplicada per la probabilitat de guanyar; el mateix per les vegades en que arriba en segon lloc, tercer, etc.)

6.2.2.2 MÈTODE NAIADE

El mètode NAIADE és un mètode discret d'avaluació multicriteri, la matriu d'impacte del qual pot incloure informació mixta (quantitativa – *crisp, fuzzy*, estocàstica – i qualitativa – lingüística) i amb diferents graus d'incertesa (Munda, 1995). El procés d'agregació del NAIADE es basa en:

A. una **comparació entre els valors de cada criteri per cada parella d'alternatives**. En primer lloc en la matriu d'impacte per cada criteri es defineixen quatre llimdars: indiferència ($\mu=$), dèbil indiferència ($\mu\sim$), preferència / rebuig ($\mu>$; $\mu<$) i forta preferència / fort rebuig ($\mu>>$; $\mu<<$) (Taula 6.4). Donat que en el cas que ens ocupa hi ha una forta incertesa per poder establir aquests llimdars, s'ha marcat el llimdar de dèbil indiferència entre dues alternatives per un mateix criteri a partir de l'error estàndard màxim del valor mig assignat a cada criteri. Això ens permet establir la distància mínima entre dos números per sota de la qual augmenta la credibilitat de que les dues alternatives siguin indiferents per aquell criteri. Pel creixement dels arbres i la producció de biomassa herbàcia, les converses amb els propietaris dels terrenys ens han ajudat a definir els llimdars (un increment del 20% respecte el valor de l'alternativa control), que ens marca el creixement dels roures o l'increment de biomassa mínima per establir el límit de dèbil preferència ($\mu\sim$) i preferència ($\mu>$; $\mu<$) respectivament. Per definir els altres llimdars, s'ha fet una anàlisi de sensibilitat, modificant-los (més o menys restrictius) sempre dins una lògica basada en els resultats de la tesi.

A la Figura 6.2 es mostra un exemple de com s'han establert les relacions de preferència en el cas de la variable nitrogen. S'estableixen quatre relacions de preferència definides com: ($\mu>> i \mu>$), amb la seva respectiva simètrica ($\mu<<$; $\mu<$). Aquests llimdars marquen el límit del vermell, és a dir el valor a partir del qual deixa de ser preferit (ex. 35 Kg ha⁻¹). Aquest punt

està definit per la intersecció amb el paràmetre α , que expressa el mínim requeriment per que sigui creïble. A la mateixa figura es pot observar el mateix, però en aquest cas es mostra el punt que defineix el límit segons el qual deixa de ser indiferent ($\mu = i \mu \sim$).

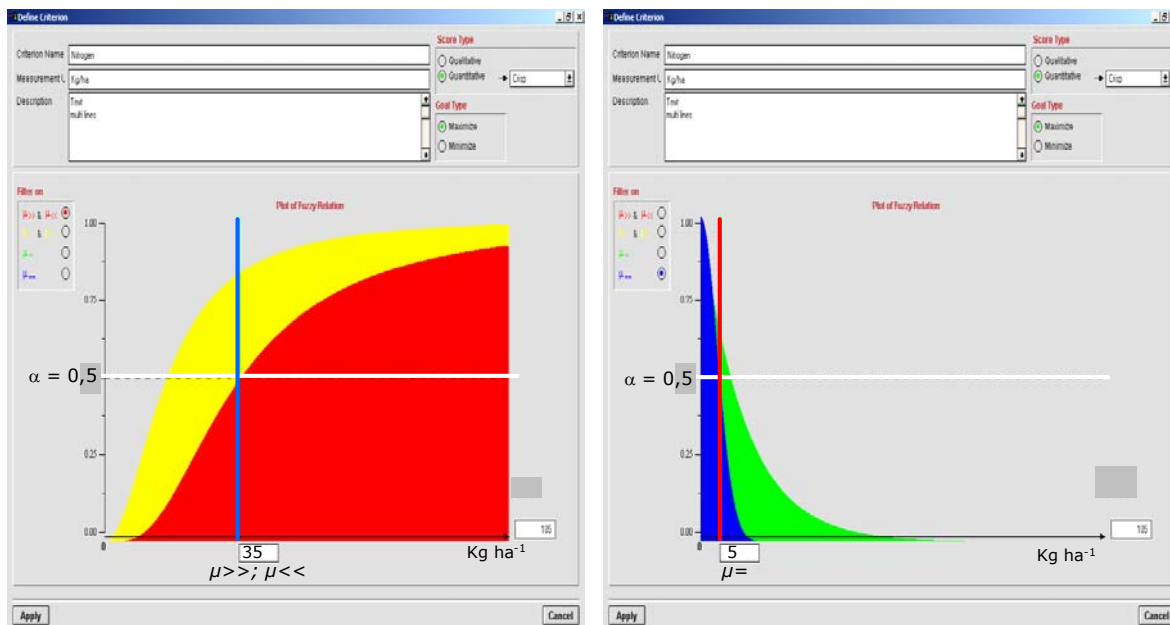


Figura 6.2. Definició de criteris i relacions de preferència en el mètode d'agregació de criteris NAIADÉ (Munda, 1995).

Taula 6.4. Llindars de preferència establerts per a cada criteri.

a) Zona A: La Vallmitjana

Criteri	indiferència $\mu =$	dèbil indiferència $\mu \sim$	preferència / rebuig $\mu > ; \mu <$	forta preferència / fort rebuig $\mu >> ; \mu <<$
C-mic /C-Org	0,05	0,12	0,23	0,45
N-NO3	5	8	16	35
Creixement roures	4	7	11	17
biomassa herbàcia	10	17	34	55
plantes ruderals	3	6	12	20
Costos econòmics	90	150	250	300
olor	-	-	-	-

b) Zona B: El Puig

Criteri	indiferència $\mu =$	dèbil indiferència $\mu \sim$	preferència / rebuig $\mu > ; \mu <$	forta preferència / fort rebuig $\mu >> ; \mu <<$
C-mic /C-Org	0,05	0,086	0,17	0,34
N-NO3	10	15	30	60
biomassa herbàcia	20	35	45	55
H- Shannon-Weaver	-	-	-	-
Costos econòmics	90	150	250	300
olor	-	-	-	-

c) segons els criteris proposats pels propietaris dels terrenys a restaurar

Criteri	indiferència $\mu =$	dèbil indiferència $\mu \sim$	preferència / rebuig $\mu > ; \mu <$	força preferència / fort rebuig $\mu >> ; \mu <<$
recobriments	9	10	15	20
Creixement roures	4	7	11	17
biomassa herbàcia	10	17	34	55
Costos econòmics	90	150	250	300
olor	-	-	-	-

Aquests llinars ens permeten establir les relacions de preferència en les comparacions a parella, a través del càlcul de la distància semàntica entre els valors. En el cas de l'avaluació numèrica, la distància es defineix com una diferència entre dos números. Si es tractés d'una avaluació *fuzzy* o estocàstica, la distància semàntica, que mesura la distància entre dues funcions, s'utilitza tenint en consideració la posició i la forma de les dues funcions. La comparació entre dues distàncies semàntiques es basa en les relacions de preferència. Aquestes relacions estan definides per sis funcions que expressen, per a cada criteri (depenent de la distància entre alternatives), si una alternativa és *molt millor*, *millor*, *igual*, *aproximadament igual*, *pitjor* i *molt pitjor* que l'altra. A cada una d'aquestes relacions hi va associat un índex de credibilitat que es mou entre 0 (definitivament no creïble) i 1 (definitivament creïble) i incrementa de manera monòtona entre aquest interval (Munda, 1995).

Un cop realitzada la comparació entre parelles d'alternatives, s'han de combinar, a través d'un algoritme d'agregació, els índexs de credibilitat obtinguts de cada relació de preferència definida anteriorment. Això es fa en funció de: (i) el número de criteris a favor d'una alternativa i (ii) la intensitat de preferència de cada criteri, mesurada per la credibilitat que una alternativa (per aquell criteri) és millor que l'altra (Gamboa, 2003)

B. Agregació de criteris utilitzant un algoritme d'agregació dels índexs de credibilitat. El mètode NAIADÉ calcula un índex de credibilitat de la intensitat de preferència d'una alternativa en relació a una altra, utilitzant el paràmetre α , que expressa el mínim requeriment dels índexs de credibilitat. En el nostre cas s'ha establert en $\alpha = 0,4$, això significa que en el procés d'agregació únicament es tenen en compte aquells criteris que en la comparació de dues alternatives presenten un índex de credibilitat superior al llinar establert ($> 0,4$).

El mètode NAIADÉ té un *ranking* d'alternatives basat en els índexs d'intensitat de preferència. La classificació final prové de la intersecció de dos classificacions per separat. El primer (ϕ^+) expressa la força de cada alternativa en relació a la resta i es basa en les relacions *millor* i

molt millor, mentre que el segon (ϕ^-) expressa la debilitat de cada alternativa en relació a la resta i es basa en les relacions de preferència *pitjor* i *molt pitjor*. Ambdós *rankings* tenen un valor entre 0 i 1, que expressa la intensitat de les relacions (Munda, 1995). Per una alternativa determinada, el concepte de força i debilitat representa respectivament sobre quantes alternatives ha estat superior en la comparació a parella i per quantes alternatives ha estat superada. D'aquesta manera s'obté una ordenació que pot ser completa, quan existeixen relacions de preferència i indiferència, o parcial, en aquest cas pot haver-hi relacions d'incomparabilitat entre alternatives. Les relacions d'incomparabilitat es produeixen en aquells casos on no és possible establir una relació de preferència o indiferència entre dues alternatives.

6.2.1. CLASSIFICACIÓ DE LES ALTERNATIVES (RANKING) I SUGGERIMENTS D'ACTUACIÓ POSSIBLES

6.2.3.1 CLASSIFICACIÓ AMB EL MÈTODE REGIME

El mètode Regime, a partir de la matriu de freqüències, ens estableix una ordenació en termes de probabilitat, donant major probabilitat a la millor de les alternatives. A la Figura 6.3 es mostren els resultats obtinguts pels tres casos estudiats: (A) la Vallmitjana; (B) El Puig; i (C) a partir dels criteris proposats pels propietaris del terreny a restaurar.

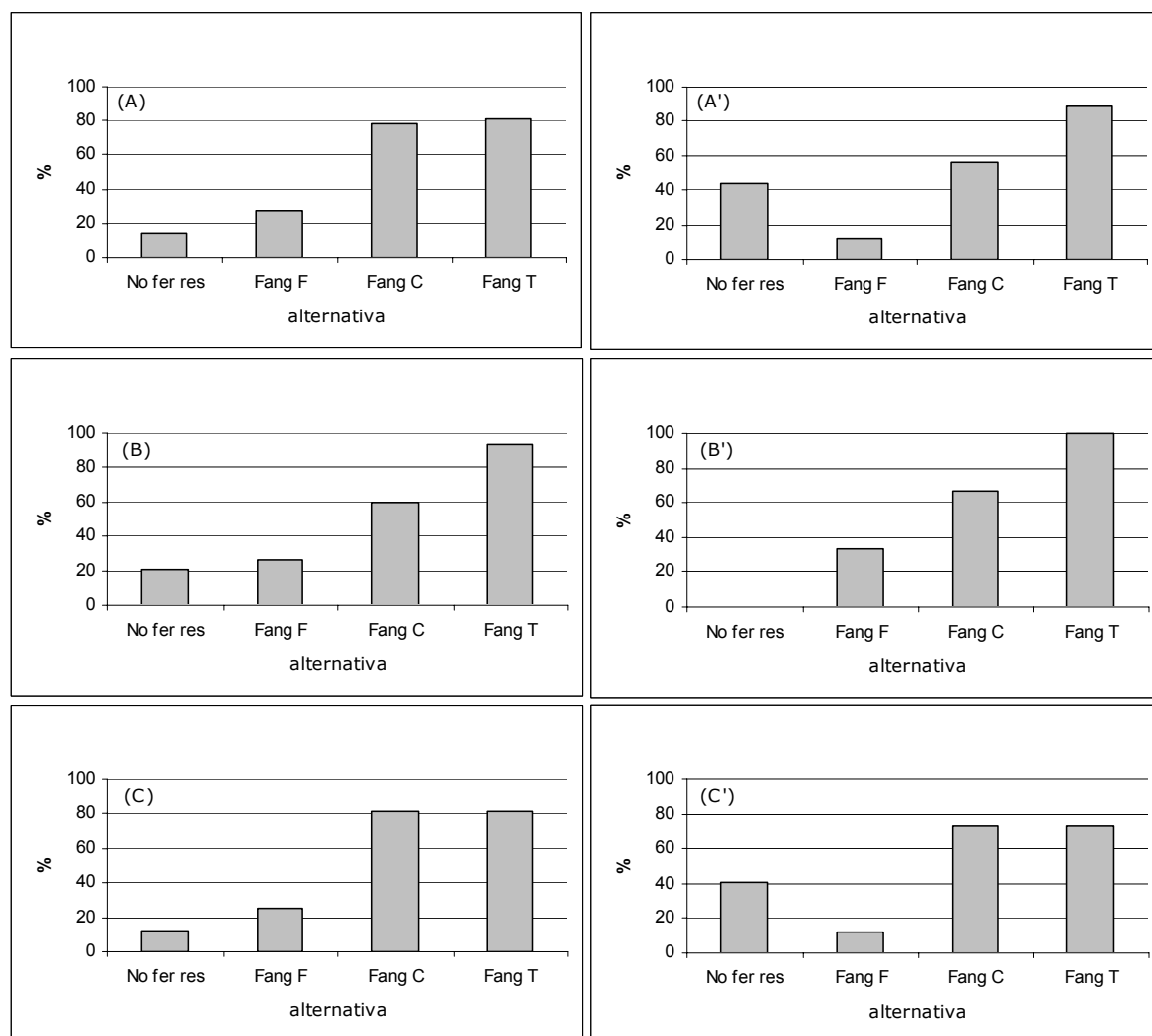


Figura 6.3. Probabilitat (%) segons la qual una alternativa es considerada millor que l'altre. Resultats obtinguts sense considerar pesos (A); (B); (C); i considerant pesos (A'); (B'); (C').

Aquests resultats ens permeten dir quina és la millor de les alternatives. Cal distingir entre els resultats obtinguts al haver assignat pesos als criteris i sense haver-ne considerat. En aquest cas, es pot veure clarament com en posar pes es veu incrementada la probabilitat d'una alternativa en relació a l'altra. Pel que fa a les alternatives fang compostat i fang tèrmic, a la zona A, quan els criteris no porten associat cap pes, tenen idèntica probabilitat de ser de manera indiferent l'alternativa més adequada. En el moment en que s'assigna un pes (importància) augmenta la probabilitat que sigui l'alternativa d'aplicar el fang tèrmic, en detriment a l'alternativa del fang compostat, donat que el pes del criteri econòmic afavoreix al primer. Pel que fa a les altres dues matrius, es produeix el mateix efecte però, donat que hi ha un criteri ecològic menys, cada un d'ells pesa proporcionalment més, en el conjunt i, per tant, en assignar pesos als criteris el percentatge de probabilitat varia menys que en el primer cas. Tot i no poder establir un ranking de prioritats, en aquest cas, donat que entre la

alternativa fang compostat i fang tèrmic pràcticament no hi ha diferències, atenent als criteris considerats, podríem proposar el següent:

❖ Zona A:

- sense pes als criteris, amb una probabilitat del 78-81%: (Fang Tèrmic = Fang Compostat) > no fer res ≠ fang fresc
- amb pes als criteris, amb una probabilitat del 89% el fang Tèrmic és l'alternativa més adequada.

❖ Zona B:

- amb i sense pes als criteris, amb una probabilitat del 90%, el fang Tèrmic és l'alternativa més adequada.

❖ segons els criteris proposats pels propietaris dels terrenys a restaurar:

- amb i sense pes: (Fang Tèrmic = Fang Compostat) > no fer res ≠ fang fresc

D'aquesta manera podem concloure que la millor alternativa de fertilització seria aplicar fang tèrmic o compostat indistintament si la intervenció va dirigida a restaurar el sòl de la zona A (la Vallmitjana) o el fang tèrmic si es tracta de la zona B (El Puig).

6.3.2.2 CLASSIFICACIÓ AMB EL MÈTODE NAIADÉ

La figura 6.4 mostra els *rankings* finals per cada cas estudiat.

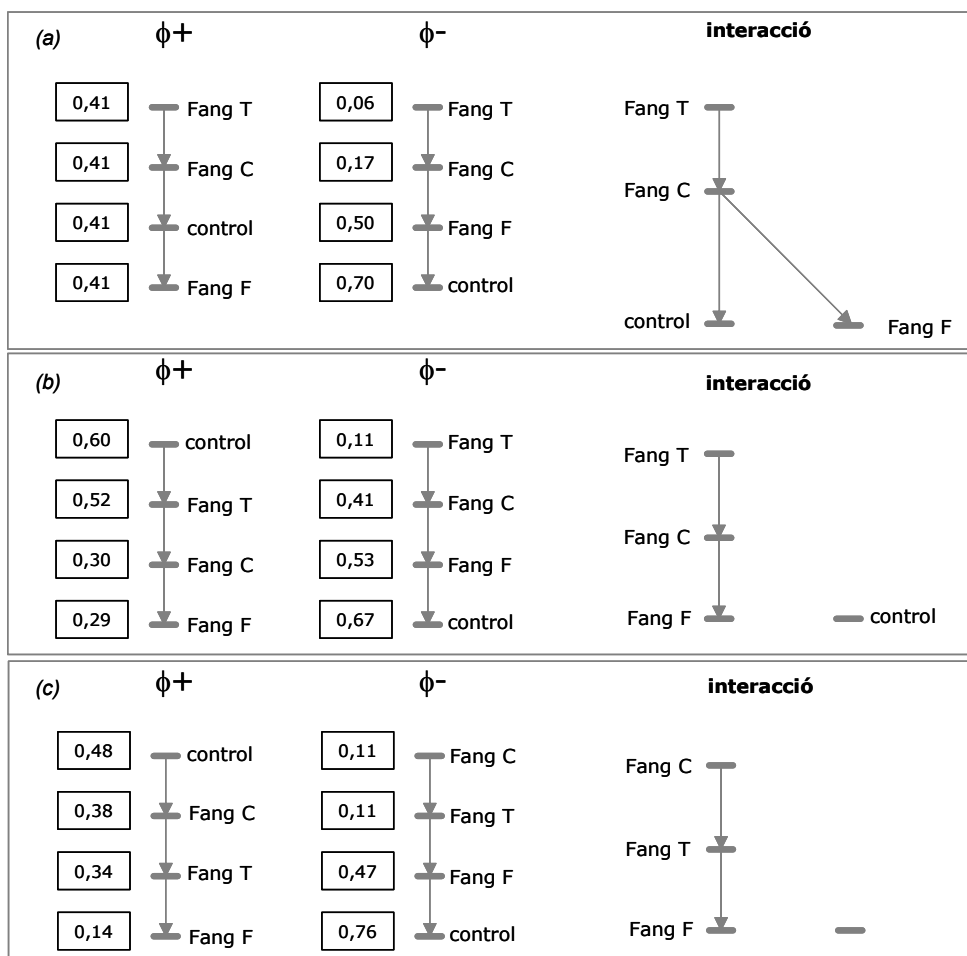


Figura 6.4. Ranking d'alternatives dels tres casos estudiats. (a) la Vallmitjana, (b) El Puig i (c) escenari del propietari dels terrenys a restaurar .Força (ϕ^+), debilitat (ϕ^-) i la seva interacció.

L'anàlisi de sensibilitat realitzat modificant els llindars establerts (taula 6.4), donada la incertesa a l'hora d'establir els límits en les relacions de preferència, ha demostrat que l'anàlisi és suficientment robust, ja que l'ordenació de les alternatives no varia pràcticament. Aquesta anàlisi, per suposat, s'ha fet cenyint-nos sempre als resultats de la tesi, assegurant-nos que no estàvem establint una relació de preferència contradictòria amb els resultats observats en els altres capítols. Així doncs, per la zona A (La Vallmitjana), el ranking d'alternatives demostra que la pràctica de fertilització més adequada, en base als criteris i alternatives escollits, és l'aplicació de fang tèrmic, seguit del compostat i en tercer lloc el fresc i control al mateix nivell. És interessant, però, destacar que entre l'alternativa control i aplicar fang fresc hi ha una relació d'incomparabilitat, és a dir, no es pot establir quina de les dues alternatives és millor. Aquesta relació d'incomparabilitat ens està indicant que hi ha uns criteris molt a favor d'una i al mateix temps molt en contra de l'altra, de manera que no es poden establir relacions de preferència o indiferència. Pe contra, a la figura 6.5, es mostra un exemple en el qual s'observa que el fang tèrmic i compostat són gairebé indiferents i, que

l'únic criteri que els diferencia, atorgant el primer lloc de la classificació al fang tèrmic, és el criteri econòmic (C6).

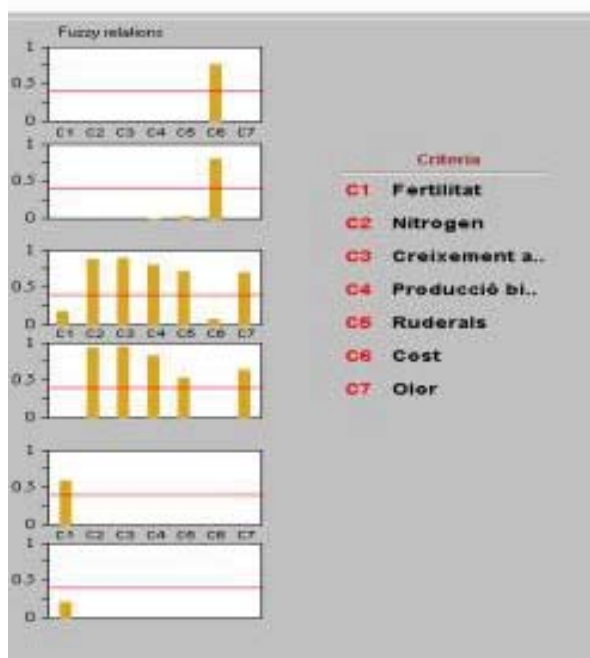


Figura 6.5. Resultats de la comparació en parelles entre les alternatives de fertilització amb fang compostat i de secatge tèrmic a la zona A (La Vallmitjana).

Pel que fa als criteris ecològics (producció de nitrats, creixement dels arbres, biomassa vegetal, percentatge de ruderals), la distància que els separa està definida amb la relació de preferència *igual*, aproximadament *igual*. Pel que fa al criteri emprat com a indicador de fertilitat (C-mic/C-Org), tot i ser major en el cas del fang compostat, únicament es pot dir

que és millor. Això fa difícil establir una preferència i, per tant, podem dir, de millor a pitjor, que l'ordenació de les alternatives és el següent: aplicació del fang d'assecatge tèrmic, compostat i fresc. Donada la relació d'incomparabilitat del fang fresc amb l'alternativa de no intervenir no es pot atribuir en l'ordenació final un ordre de prioritat entre aquestes dos alternatives.

Pel que fa al *ranking* a la zona B, veiem com es manté la mateixa ordenació, en aquest cas però, les tres alternatives de fertilització son incomparables amb el control. Això ens està indicant que els criteris a favor i en contra, en la comparació a parelles, entre el control (no fer res) i la resta d'alternatives està equilibrada. En l'anterior cas aquesta relació d'incomparabilitat ja es produïa entre el fang fresc i el control. Això ens està indicant, com ja havíem apuntat al considerar les alternatives, que l'alternativa no fer res no pot ser una opció a considerar si el que es vol és recuperar sòls degradats. Com demostra el fet que els criteris a favor de la utilització del fang fresc coincideixen amb la majoria de criteris indicadors de l'èxit de la recuperació del sòl (C-mic/C-Org, biomassa herbàcia i concentració de nitrats). En aquest cas, hi ha una contraposició d'interessos entre dimensions, la dimensió ecològica versus la dimensió econòmica i social. Així doncs, podem establir, en aquest cas un *ranking* d'alternatives amb el fang tèrmic en primer lloc, seguit de compostat i finalment el fang fresc i tots ells incomparables amb l'alternativa no fer res.

Finalment, el problema plantejat segons la visió dels propietaris (c), ha resultat ser gairebé idèntic als altres dos casos. En aquest cas, però, el *ranking* d'alternatives atorga la primera

classificació al fang compostat. No obstant, igual com passava a la zona A, aplicar fang compostat o d'assecatge tèrmic es podria considerar indiferent. En aquest cas l'alternativa no fer res, igual com passava a la zona b, ha resultat també incomparable amb la resta.

6.3 CONCLUSIONS

Davant d'una elecció multicriteri podem concloure que les alternatives d'aplicar fang tèrmic i compostat són les més adequades, donat que s'assoleixen els múltiples objectius plantejats, una millora de les propietats i funcions del sòl, amb un resposta de la vegetació positiva, minimitzant el cost econòmic .

CONSIDERACIONS FINALS

Aquests resultats ens fan reflexionar sobre la importància de la tria dels criteris. Escollir un criteri més o menys pot modificar l'ordenació de les alternatives en el *ranking* final. En aquesta tesi no s'ha estudiat els components tòxics dels fangs, i les repercussions d'aquests sobre l'ambient i/o la salut, però si que s'han detectat efectes negatius sobre la germinació i creixement de plantes. A més, altres experiments fets amb aquests residus han revelat alguns indicis de toxicitat relacionats al fang d'assecatge tèrmic, com ho demostra un temps de supervivència molt menor del col·lèmbol *Folsomia candida* en els sòls que han rebut aquest fang (Ecofangs, 2003). Si s'haguessin considerat els efectes ecotòxics en l'estructuració del problema, molt probablement hauríem obtingut una altra ordenació final. Donats aquests indicis es podria adoptar una posició des d'un punt de vista ètic i, desestimar l'alternativa que apareix en primer lloc al *ranking* final, el fang d'assecatge tèrmic, donat que no es compleix un dels tres objectius, és a dir minimitzar els impactes negatius sobre el medi i/o la salut.

També és fonamental la qualitat de la informació. S'ha vist que el criteri econòmic és determinant, en l'ordenació final de les alternatives. Això ens fa pensar la importància, en aquest tipus d'estudis de considerar la dimensió econòmica en la seva totalitat, és a dir, no únicament el cost que suposa l'aplicació dels fangs, sinó també els beneficis que s'obtidran. Malauradament no disposem de la informació necessària per quantificar els possibles beneficis. Aquests podrien derivar de l'increment de la superfície de pastura i, per tant, el nombre de caps de bestiar que pot suportar aquella àrea, la reducció del risc d'incendi, ja que la transformació d'una brolla en devesa té com objectiu, entre altres, fer de tallafocs natural, l'increment de plantes farratgeres, etc.

Aquest tipus d'anàlisi són molt útils ja que ens donen la possibilitat d'incloure tot tipus d'informació per arribar a determinar quina de les alternatives és la més adequada. Al haver comparat dos mètodes, el Regime i el NAIADE, hem pogut comprovar que hi ha una forta

consistència en els resultats. Finalment, es pot destacar la importància d'aquests mètodes ja que són un bon instrument d'aprenentatge, és a dir, el mateix procés que va des de l'estructuració del problema, passant per l'assignació de pesos i la discussió final ens ensenya, en tot moment, quins són els factors que fan variar l'ordenació final de les alternatives o que otorguen amb una probabilitat major una alternativa com a preferida. Per tant, es pot replantejar les anàlisis multicriteri incorporant aquells elements que són clau en l'avaluació del problema.

Per acabar, un petit apunt per a futurs treballs relacionats a la problemàtica dels fangs. Donades les potencialitats, no explorades en aquest treball, d'aquests mètodes, seria molt interessant poder construir el model a partir de l'escenari ideal ja comentat. És a dir un estudi on tots els actors estiguessin representats, de manera que es pogués estructurar el problema a partir de la visió de totes les parts implicades, és a dir, un problema amb tots els punts de vista i interessos en joc.

6.4 REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Belton, V. & Stewart, T. 2002. Multiple Criteria Decision Analysis an integrated approach. Kluwer, Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.
- Bernal, M.P.; Sánchez-Monedero, M. A.; Paredes, C. & Roig, A. 1998. Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 69, Issue 3, 6 July 1998, Pages 175-189.
- Burton, C.H. 2001. Dealing with livestock manures: water management strategies for waste minimization, conservation, re-cycling and treatment. 5º curso de Ingeniería Ambiental: Aplicación agrícola de residuos orgánicos. Boixadera, J. i Teira, M.R (Eds). Lleida, 23-25 abril. p. 37
- DNRE, 1998. Biosolids in Victoria – Report on Options for Beneficial Use of Biosolids. In: Long, K. 2001. The use of Biosolids (sewage sludge) as a fertilizer / soil conditioner on Dairy Pastures: a review from a Dairy Food Safety perspective.
- Espelta, J.M.; Retana, J. & Habrouk, A. 2002. An economic and ecological multi-criteria evaluation of reforestation methods to recover burned *Pinus nigra* forests in NE Spain. *Forest Ecology and Management*. 180: 185-198.
- European Commission. 1991. Directive 91/271/ECC
- European Communities, 2001. Disposal and recycling routes for sewage sludge. Part 1. Sludge acceptance.
- Hinloopen, E., Nijkamp, P. & Rietveld, P. 1983.. "The regime method: A new multicriteria technique", in: P. Hansen (ed.), *Essays and Surveys on Multiple Criteria Decision Making*, Springer, 146-155
- Janssen, R.& Munda, G. 1998. Multi-criteria methods for quantitative, qualitative and fuzzy problems. In van der Bergh (ed). *Handbook of Environmental and Resource Economics* 58: 837-852
- Martínez-Alier, J; Munda, G. & O'Neill J. 1998. Weak comparability of values as a foundation for ecological economics *Ecological Economics* 26 277-286.
- Milton, N.; Braimbridge, M. & Murphy, D. 1984. Soils are alive!. Centre for Land Rehabilitation, UWA 9380 1884 (or 2494)
- Munda, 1995. Multi-Criteria Evaluation in a fuzzy environment. Theory and applications in ecological economics. Physica-Verlag, Heidelberg
- Munda, G. 1998. Multi-Criteria Evaluation. In *Modelling in Ecological Economics*. Proops, J.& Safinoy, P (eds)
- Munda, G. 2003. "Social Multi-Criteria Evaluation (SMCE): Methodological Foundations and Operational Consequences." *European Journal of Operational Research*, forthcoming
- Ojeda, G. Alcañiz, J.M.; & Ortiz, O. 2003. Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge. *Land Degradation & Development*. 14: 563-573.
- Powlson, D.S., Brookes, P.C. & Christensen, B.T. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.* 19:159–164.
- Ross, D.J.K., Tate, R., Cairus, A., Mayricbt, K.F. & Pursic, E.A. 1982. Restoration of pasture after topsoil removal: effect of soil carbon and nitrogen mineralization, microbial biomass and enzyme activities.

Soil Biology & Biochemistry 14, 575–581

Sommers, L.E. 1977. Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers. J. Environ. Qual. 6: 225-232.

Werther, J. & Ogada, t. 1997. Sewage sludge. Progress in Energy and combustion Science. 25 : 55-116.

CAPÍTOL 7

SÍNTESI DE LES CONCLUSIONS

7 SÍNTESI DE LES CONCLUSIONS

Com a cloenda d'aquesta tesi es presenta a continuació un resum dels aspectes positius i negatius observats en la utilització de fangs de depuradora per a la rehabilitació de sòls, en especial en l'àmbit forestal

7.1 AVANTATGES D'UTILITZAR FANGS DE DEPURADORA

Els fangs funcionen com a catalitzadors del restabliment de la biofuncionalitat de sòls degradats sempre i quan la seva aplicació es realitzi en la dosi i forma adequades. Aquest tipus d'intervencions presenten algunes avantatges en comparació a l'ús de fertilitzants minerals. L'aportació d'una matèria orgànica fresca com la predominant en els fangs es tradueix en un increment de l'activitat respiratòria del sòl i en una major proliferació de la biomassa microbiana. La millora de les propietats biològiques, físiques i nutritives del sòl estimula el creixement dels arbres i afavoreix un major desenvolupament de la biomassa herbàcia i, consegüentment, del recobriment del sòl, reduint d'aquesta manera el risc d'erosió superficial.

7.2 DESAVANTATGES D'UTILITZAR FANGS DE DEPURADORA

L'aportació al sòl d'una matèria orgànica fàcilment mineralitzable provoca una menor eficiència microbiana. El descens dràstic del qCO_2 , en aquest cas, ens pot estar indicant algun tipus d'estrès, provocat per algun agent inhibidor que fa que els microorganismes siguin menys actius.

D'altra banda, l'aplicació superficial de fangs en zones forestals, atesa la seva ràpida mineralització, pot causar pèrdues de nitrogen per lixiviació i/o escolament superficial i provocar fenòmens de contaminació difusa. Per tant serà molt important limitar les dosis cas que es realitzin aquestes pràctiques de forma extensa ja que el nitrogen no queda gaire estabilitzat en el sòl, fet que obligaria a repetir les aplicacions en anys successius.

En els bioassaigs a petita escala, ha quedat demostrat que en les mescles de sòl amb fang es produeix una certa inhibició de la germinació de les plantes seleccionades, i que afecta molt més a les crescudes en sòl adobat amb fang tèrmic, fins al punt d'inhibir el seu creixement.

L'ús de fangs com a adob provoca també una certa ruderalització i reducció de la diversitat florística de les àrees estudiades.

7.3 COMPARACIÓ DELS TRES FANGS EMPRATS

La matèria orgànica dels fangs es mineralitza a un ritme força elevat, sobretot en aquells que contenen una proporció important de compostos làbils, com el fang tèrmic i, en segon lloc el fresc. El fang compostat és el que presenta una major estabilitat de la matèria orgànica i uns efectes menys intensos però més perdurables en el període de temps estudiat. La disminució dràstica observada en l'eficiència dels microorganismes del sòl, com ho reflexa el seu quocient metabòlic microbià (qCO_2), és molt més accentuada en els sòls esmenats amb fangs assecats tèrmicament. Això ens pot estar indicant que hi ha hagut l'alliberació o activació d'algun agent tòxic d'aquests fangs. Podem dir, per tant, que en el procés de post-tractament dels fangs es produeixen canvis en les propietats bioquímiques que, entre d'altres, influeixen en la mineralització del nitrogen orgànic, sent també més ràpida en els fangs d'assecat tèrmic.

En condicions controlades de laboratori, els fangs fresc i compostat provoquen un efecte positiu, relacionat amb l'aportació de nutrients, que es tradueix en una major producció vegetal que la dels respectius controls. Igualment en condicions naturals, l'aplicació de fangs afavoreix un major desenvolupament de la biomassa herbàcia. Aquest efecte, però, és dependent del sòl receptor. Sobre el sòl de textura franca, els fangs frescos són els que generen major fitomassa, seguit dels tèrmics i els compostats. Aquest efecte també es detecta sobre el recobriment vegetal, ja de per si elevat en tots els tractaments.

Donats els indicis de toxicitat observats en alguna partida de fang tèrmic es recomana no aplicar-lo de manera generalitzada i seria interessant continuar investigant aquests residus, en relació a paràmetres indicadors que puguin servir-nos per assegurar la seva innoïtat i garantir que no representen cap risc per l'ambient i en conseqüència per l'home.

La utilització d'eines d'avaluació, com les anàlisi multicriteri poden ser molt útils com a suport en les preses de decisions en projectes que tenen com objectiu la recuperació de sòls degradats, o altres pràctiques de restauració, i al mateix temps com a instrument d'aprenentatge, al poder replantejar les anàlisis incorporant aquells elements que són clau en l'avaluació del problema.

ÍNDEX DE TAULES I FIGURES

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1.1 (a) Descripció del perfil del sòl de l'àrea d'estudi	20
Taula 1.1 (b) Anàlisi dels paràmetres físico-químics dels diferents horitzons	21
Taula 1.2 Caracterització de les restes vegetals triturades segons el tamany dels fragments	24
Taula 1.3 Quantitats de fang i adob mineral i equivalència en nitrogen i fòsfor aportades en les parcel·les adobades amb fang i amb fertilitzant mineral.	24
Taula 1.4 Principals paràmetres analitzats dels sòls i del fang aplicat. (n=5)	25
Taula 1.5 Periodicitat dels mostrejos que han seguit des del moment de l'aplicació fins al final de l'experiment.	26
Taula 1.6. ANOVA de mesures repetides ($p < 0,05$) tenint en compte els diferents factors: fertilitzant, temps i la interacció (fertilitzant*temps).	38
Taula 1.7. Pèrdua estimada de nitrogen ($\text{NH}_4 + \text{NO}_3$), en funció de diferents superfícies de captació del canal Gerlach, a les parcel·les fertilitzades.	41
Taula 2.1 Resultats analítics dels principals paràmetres dels sòls utilitzats en aquest experiment.	58
Taula 2.2 Paràmetres bàsics dels tres tipus de fangs utilitzats en aquest experiment. matèria seca ($\alpha 105^\circ\text{C}$);	59
Taula 2.3. Resultats analítics dels principals paràmetres valorats de les mescles sòl-fang analitzats a l'inici de l'experiment.	61
Taula 2.4. Periodicitat dels mostrejos que han seguit des del moment de l'aplicació fins al final de l'experiment.	62
Taula 2.5. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) de l'activitat respiratòria potencial a l'inici de l'experiment tenint en compte les possibles fonts de variació. i les diferents interaccions.	67
Taula 2.6. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) del Coeficient de mineralització del carboni (CMC) al principi de l'experiment tenint en compte les possibles fonts de variació.	68
Taula 2.7. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) de l'activitat respiratòria potencial al final de l'experiment tenint en compte les possibles fonts de variació.	69
Taula 2.8. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) del Coeficient de mineralització del carboni (CMC) al final de l'experiment tenint en compte les possibles fonts de variació.	69
Taula 2.9. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) del paràmetre "r" l'activitat respiratòria potencial tenint en compte les possibles fonts de variació.	70
Taula 2.10. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) del paràmetre "r" del Coeficient de mineralització del carboni (CMC) tenint en compte les possibles fonts de variació.	71
Taula 2.11 ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) de la Biomassa microbiana al principi de l'experiment tenint en compte les possibles fonts de variació.	74
Taula 2.12. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) de C-mic/C-Org al principi de l'experiment tenint en compte les possibles fonts de variació.	75
Taula 2.13. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) de la biomassa microbiana al final de l'experiment tenint en compte les possibles fonts de variació.	76
Taula 2.14. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) de C-mic/C-Org al final de l'experiment tenint en compte les possibles fonts de variació.	77
Taula 2.15. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) del paràmetre "r" de la biomassa microbiana tenint en compte les possibles fonts de variació.	77
Taula 2.16. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) del paràmetre "r" de C-mic/C-Org tenint en compte les possibles fonts de variació.	78
Taula 2.17. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) del quocient metabòlic ($q\text{CO}_2$) al principi de l'experiment tenint en compte les possibles fonts de variació.	80
Taula 2.18. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) del quocient metabòlic ($q\text{CO}_2$) al final de l'experiment tenint en compte les possibles fonts de variació.	80

Taula 2.19. ANOVA d'un factor ($p < 0,05$) del paràmetre "r" del quocient metabòlic (qCO_2) tenint en compte les possibles fonts de variació.	81
Taula 2.20. Resum dels principals efectes dels factors avaluats sobre els paràmetres biològics del sòl.	83
Taula 3.1 (a) Descripció del perfil del sòl de l'àrea anomenada El Puig.	98
Taula 3.1 (b) Anàlisi dels paràmetres físico-químics dels diferents horitzons.	99
Taula 3.2 Propietats físiques i químiques dels sòls.	102
Taula 3.3. Principals propietats físiques i químiques dels fangs emprats en l'experiment.	103
Taula 3.4. Quantitats reals aplicades (equivalents a 6 Mg de M.O de fang ha^{-1}) dels tres tipus de fangs en cada parcel·la de 100 m^2 (Mg).	104
Taula 3.5 Periodicitat que han seguit els mostresjos des del moment de l'aplicació fins al final de l'experiment.	105
Taula 3.6. ANOVA de mesures repetides d'un factor a dos nivells ($p < 0,05$) del C-Org tenint en compte els diferents factors (tipus de fang i sòl). Temps agrupat en dues categories (1-4: quatre primers mostresjos; 5-7: tres darrers mostresjos).	111
Taula 3.7. ANOVA de mesures repetides d'un factor a dos nivells ($p < 0,05$) de l'ARP ($mg\ C-CO_2\ Kg^{-1}\ h^{-1}$) tenint en compte els diferents factors (tipus de fang i sòl).	112
Taula 3.8. ANOVA de mesures repetides d'un factor a dos nivells ($p < 0,05$) del CMC tenint en compte els diferents factors (tipus de fang i sòl).	114
Taula 3.9. ANOVA de mesures repetides d'un factor a dos nivells ($p < 0,05$) de la biomassa microbiana ($\mu g\ C-mic\ g^{-1}$) tenint en compte els diferents factors.	115
Taula 3.10. ANOVA de mesures repetides d'un factor a dos nivells ($p < 0,05$) del quocient C-mic/C-Org tenint en compte els diferents factors.	117
Taula 3.11. ANOVA de mesures repetides d'un factor a dos nivells ($p < 0,05$) del quocient metabòlic [$(g\ C-CO_2 / g\ C-mic)\ h^{-1} \times 10^{-3}$] tenint en compte els diferents factors.	118
Taula 3.12. ANOVA de mesures repetides d'un factor a dos nivells ($p < 0,05$) del flux de CO_2 ($gCO_2\ m^{-2}\ h^{-1}$) tenint en compte els diferents factors.	121
Taula 3.13. Resum dels principals efectes observats sobre els paràmetres biològics del sòl.	123
Taula 4.1. Composició de les formes nitrogenades al sòl (Anderson et al., 1989).	135
Taula 4.2. Nitrogen mineral ($N-NH_4 + N-NO_3$ $m\ Kg^{-1}$) en els sòls de la Vallmitjana (G) i el Puig (M) en els diferents mostresjos al llarg del període estudiat.	148
Taula 4.3. Concentració màxima mitjana detectada al sòl, percentatge en terra fina, densitat aparent i concentració estimada expressada en $Kg\ N-NO_3\ ha^{-1}$	159
Taula 5.1 Quantitats de fangs emprades per fer les mescles.	172
Taula 5.2. Germinació de <i>D.glomerata</i> als 15 dies sobre extractes del sòl arenós (S) i argilós (A) tractats amb tres tipus de fangs de depuradora: fresc (F), tèrmic (T) i compostat (C).	176
Taula 5.3 Germinació directa (%) de <i>L.perenne</i> i <i>D.glomerata</i> sobre el sòl arenós (S) i argilós (A) tractats amb tres tipus de fangs de depuradora: fresc (F), tèrmic (T) i compostat (C).	177
Taula 5.4. Creixement en alçada ($t=30$ dies) en les mescles de sòl arenós (S) i argilós (A) tractats amb tres tipus de fangs de depuradora: fresc (F), tèrmic (T) i compostat (C).	178
Taula 5.5. Creixement en alçada als 2 mesos aproximadament ($t=69$ dies) en les mescles de sòl arenós (S) i argilós (A) tractats amb tres tipus de fangs de depuradora: fresc (F), tèrmic (T) i compostat (C).	178
Taula 5.6. Resultats de l'anàlisi de la variància (ANOVA dos factors) en base al tractament (tipus de fang i control) i el tipus de sòl (sauló i argilós).	180
Taula 5.7 Mitjana del recobriment (desviació estàndard) dels diferents grups d'espècies respecte el total de la vegetació, en funció dels diferents tractaments (control, fang compostat, fang fresc i tèrmic). $N=5$	191
Taula 5.8 Diversitat específica (Shannon-Weaver) als sòls de la Vallmitjana dos mesos i un any després de l'aplicació dels fangs.	192
Taula 5.9 Espècies més abundants en els sòls esmenats amb fang (C, F, T) i el sòl control de la Vallmitjana, l'any 2001 i 2002.	193
Taula 5.10 Mitjana ($\pm SD$) del percentatge de recobriment (grup funcional/total vegetació) de cada grup funcional en relació al total de la vegetació. $N=3$	196
Taula 5.11 Espècies més abundants en els sòls esmenats amb fang (C, F, T) i el sòl control de El Puig, l'any 2002.	197
Taula 5.12 Comparació del creixement relatiu (RGR) de la variable altura de l'arbre, dels roures (<i>Quercus humilis</i>) $N = 5$ parcel·les.	198

<i>Taula 6.1. Matriu d'impacte (criteris × alternatives) per a l'avaluació. Zona A: La Vallmitjana (zona forestal cremada)</i>	213
<i>Taula 6.2. Matriu d'impacte (criteris × alternatives) per a l'avaluació. Zona b: El Puig (camp abandonat)</i>	213
<i>Taula 6.3. Matriu (criteris × alternatives) d'impacte elaborada segons els criteris proposats pels propietaris dels terrenys a restaurar: a partir de la informació recollida en entrevistes</i>	213
<i>Taula 6.1'. Matriu (criteris × alternatives) en escala ordinal. Zona A: La Vallmitjana (zona forestal cremada)</i>	214
<i>Taula 6.2'. Matriu (criteris × alternatives) en escala ordinal. Zona b: El Puig (camp abandonat)</i>	214
<i>Taula 6.3'. Matriu (criteris × alternatives) en escala ordinal elaborada segons els criteris proposats pels propietaris dels terrenys a restaurar: a partir de la informació recollida en entrevistes</i>	214
<i>Taula 6.4. Llindars de preferència establerts per a cada criteri</i>	217

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1.1 Perfil del sòl de la zona d'estudi i visualització dels diferents horitzons.....	19
Figura 1.2. Ubicació de l'àrea d'estudi i distribució de les parcel·les experimentals:	23
Figura 1.3. Dinàmica de la matèria orgànica al sòl: representació dels tres grans compartiments(en verd) i dels paràmetres estudiats.....	27
Figura 1.4. Comparació dels valors de C-Org (%), ARP, BMC, C-mic/C-Org; CMC i qCO ₂ entre els dos fertilitzants (mineral i fang).....	32
Figura 1.5. Variació temporal dels paràmetres biològics a les parcel·les adobades amb fang (♦) i les parcel·les adobades amb fertilitzant mineral (■).	34
Figura 1.6. Variació temporal del flux de CO ₂ a les parcel·les adobades amb fang (♦) i les parcel·les adobades amb fertilitzant mineral (■).....	35
Figura 1.7. Percentatge de pes sec romanent de les bosses de descomposició, recollides en diferents al llarg de 24 mesos, a les parcel·les tractades amb adob mineral i orgànic.....	36
Figura 1.8. Variació temporal del N-NH ₄ i del N-NO ₃ a les parcel·les adobades amb fang (♦) i les parcel·les adobades amb fertilitzant mineral (■).	37
Figura 1.9. comparació dels valors de biomassa vegetal (g m ⁻²) entre parcel·les fertilitzades amb fang de depuradora (F), fertilitzant mineral (M).....	37
Figura 1.10. Comparació del creixement relatiu durant dos anys consecutius (1999- 2000 i 2000- 2001) de la variable altura de l'arbre de les dues espècies estudiades (Quercus ilex i Quercus humilis) i segons la classe d'altura seleccionada.....	38
Figura 1.11. Comparació dels paràmetres analitzats de les mostres recollides del canal Gerlach a les parcel·les tractades amb fertilitzant mineral (M) i orgànic (F).	39
Figura 1.12. Comparació dels nivells de nitrogen d'amoni (N-NH ₄) i nitrogen de nitrat (N-NO ₃) de l'aigua recollida en els canals Gerlach a les parcel·les tractades amb fertilitzant mineral (M) i orgànic (F).....	40
Figura 2.1 Combinacions dels tres tipus de fang ("F"=fresc, "C"= compostat i "T"=tèrmic) amb dos sòls ("A"=argilós i "S"= sauló) i en dues dosis diferents ("H"= alta i "L"=baixa).....	57
Figura 2.2. Dinàmica temporal del Carboni Orgànic (% C-Org) a les incubacions de les mescles de sòl + fang.....	64
Figura 2.3. Taxa de descomposició del carboni orgànic (C-Org %) en el període d'incubació considerat (332 dies).....	65
Figura 2.4. Variació temporal de l'activitat respiratòria potencial (ARP) a les mescles de sòl + fang.....	66
Figura 2.5 ARP dels diferents tractaments al 1er i 6è mostreig.	67
Figura 2.6 CMC dels diferents tractaments al 1er i 6è mostreig. Test de Fisher LSD amb nivell de significació p<0,05.....	69
Figura 2.7. Comparació dels valors de r _{ARP} entre els diferents tractaments.	71
Figura 2.8. Comparació dels valors de r _{CMC} entre els diferents tractaments.....	72
Figura 2.9. Variació temporal de la biomassa microbiana (BMC) a les incubacions de mescles de sòl + fang	73
Figura 2.10 Nivells de biomassa microbiana en els sòls dels diferents tractaments al 1er i 6è mostreig.	74
Figura 2.11 Quocient C-mic/C-Org en els sòls dels diferents tractaments al 1er i 6è mostreig.	75
Figura 2.12. Comparació dels valors de r _{BMC} entre els diferents tractaments.....	78
Figura 2.13 Comparació dels valors de r _{CMC} entre els diferents tractaments.	79
Figura 2.14 Quocient metabòlic (qCO ₂) dels diferents tractaments al 1er i 6è mostreig.....	81
Figura 2.15. Comparació del r _{quocient metabòlic (qCO₂)} dels diferents tractaments.	82
Figura 3.1. Esquematzació dels efectes iniciadors (priming effects) induïts per l'addició d'un substrat orgànic:.....	96
Figura 3.2. Perfil del sòl de la zona del Puig.	97

Figura 3.3a. Ubicació i distribució de les parcel·les de la Vallmitjana (Taradell)	101
Figura 3.3b. Ubicació i distribució de les parcel·les de El Puig (Taradell) (3 parcel·les per tractament + 3 parcel·les control)	101
Figura 3.4 precipitació i humitat mitjana mensual del sòl (10 cm)	107
Figura 3.5 mitjana horària de la temperatura ambient i la temperatura del sòl (10 i 50 cm)	108
Figura 3.6 Variació temporal dels nivells de carboni orgànic als sòls de textura arenosa (N=5) i textura franca (N=3).	110
Figura 3.7 Dinàmica temporal de l'ARP ($\text{mg C-CO}_2 \text{ Kg}^{-1} \text{ sòl h}^{-1}$) dels sòls en els diferents tractaments (C=compostat, F=fang fresc, T=tèrmic i control).....	112
Figura 3.8. Dinàmica temporal del Coeficient de Mineralització del Carboni ($\text{h}^{-1} \times 10^{-4}$) en els diferents tractaments (C=compostat, F=fang fresc, T=tèrmic i control).....	114
Figura 3.9 Nivells de la biomassa microbiana dels sòls en els diferents tractaments (C=compostat, F=fang fresc, T=tèrmic i control)	116
Figura 3.10. Quocient C-mic/C-Org (%) en els diferents tractaments (C=compostat, F=fang fresc, T=tèrmic i control)	118
Figura 3.11. Quocient metabòlic microbià ($q\text{CO}_2$) en els diferents tractaments (C=compostat, F=fang fresc, T=tèrmic i control)	119
Figura 3.12. Variació temporal del flux de CO_2 a les parcel·les de La Vallmitjana (sòl de gresos) i el Puig (sòl de margues).	120
Figura 4.1 cicle de nitrogen al sòl. Elaboració pròpia a partir de Stevenson (1986)	135
Figura 4.2. Variació temporal del Nitrogen total a les parcel·les de La Vallmitjana (sòl de gresos) i el Puig (sòl de margues). \pm SD	142
Figura 4.3. Variació temporal del quocient C/N a les parcel·les de La Vallmitjana (sòl de gresos) i el Puig (sòl de margues). \pm SD.....	143
Figura 4.4. Variació temporal del nitrogen amoniacal (N-NH_4) a les parcel·les de La Vallmitjana (sòl de gresos) i el Puig (sòl de margues). \pm SD.....	144
Figura 4.5 Variació temporal del nitrogen de nitrat (N-NO_3) a les parcel·les de La Vallmitjana (sòl de gresos) i el Puig (sòl de margues). \pm SD.....	146
Figura 4.6 Variació temporal (\ln temps) del nitrogen mineral ($\text{N-NH}_4 + \text{N-NO}_3 \text{ mg Kg}^{-1}$) a les parcel·les de La Vallmitjana (sòl de gresos) i el Puig (sòl de margues). \pm SD.....	147
Figura 4.7. Elements per a un balanç del N a les diferents parcel·les estudiades.....	162
Figura 5.1. Esquema del disseny experimental.....	172
Figura 5.2. Corba de germinació (%) de les llavors de les dues espècies (<i>Dactylis glomerata</i> i <i>Lolium perenne</i>), sembrades en contenidors:.....	176
Figura 5.3 Corbes de creixement en alçada de <i>Lolium perenne</i> i <i>Dactylis glomerata</i> en els dos sòl (argilós i sauló) adobats amb els tres tipus de fangs de depuradora:.....	179
Figura 5.4 Efectes sobre la producció vegetal.	180
Figura 5.5 Concentració de pigments (clorofil·la a i b, carotenoids) en relació al pes sec de planta a les fulles de <i>Dactylis glomerata</i> i <i>Lolium perenne</i> procedents de plantes crescudes en dos sòls (argilós i arenós) adobats amb els tres tipus de fangs de depuradora (C = compostat; F = fresc i T = assecat tèrmicament; " - " = Control).....	181
Figura 5.6. Comparació dels valors de biomassa vegetal entre els diferents tractaments ("c"=compostat; "f" deshidratat; "t"=tèrmic i " - " = control).....	187
Figura 5.7 Percentatge de recobriment (desviació estàndard) dels diferents tractaments en dos anys consecutius (1 mes i 13 mesos després de l'aplicació) (-=control; c=compostat; f=fresc i t=tèrmic).....	190
Figura 5.8 N° mig d'espècies per transecte dels diferents tractaments en dos anys consecutius (-=control; c=compostat; f=fresc i t=tèrmic). N=5.....	190
Figura 5.9 Percentatge de recobriment (desviació estàndard) una any després de l'aplicació (juny 2002) a les parcel·les del Puig (1 mes i 13 mesos després de l'aplicació)	195
Figura 5.10 Mitjana d'espècies en els diferents tractaments als sòls de El Puig un any després de l'aplicació dels fangs (-= control; C=compostat; F=fresc; T=tèrmic)	195
Figura 5.11 Comparació del creixement relatiu en alçada dels arbres (alzines i roures) vuit mesos després de l'aplicació (desembre de 2001), 20 mesos després (desembre 2002) i 32 mesos després (desembre 2003).	199
Figura 6.1. Visió esquematitzada de l'estructura jeràrquica d'un problema afectat per les tres dimensions esmentades. (Munda, 2003).....	209

<i>Figura 6.2. Definició de criteris i relacions de preferència en el mètode d'agregació de criteris NAIADÉ (Munda, 1995).</i>	217
<i>Figura 6.3. Probabilitat (%) segons la qual una alternativa es considerada millor que l'altre.</i>	220
<i>Figura 6.4. Ranking d'alternatives dels tres casos estudiats.(a) la Vallmitjana, (b) El Puig i (c) escenari del propietari dels terrenys a restaurar.</i>	222
<i>Figura 6.5. Resultats de la comparació en parelles entre les alternatives de fertilització amb fang compostat i de secatge tèrmic a la zona A (La Vallmitjana).</i>	223