

Efecte del Contingut de Graves en la Mesura d'Humitat amb TDR

Cristina González i Flor
Especialitat: Hortofructicultura i Jardineria
Professor Ponent: Dr. Ramon Josa March
Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia
Escola Superior d'Agricultura de Barcelona
ESAB- UPC

Castelldefels, desembre del 2006

Efecte del Contingut de Graves en la Mesura d'Humitat amb TDR

Cristina González i Flor
Especialitat: Hortofructicultura i Jardineria
Professor Ponent: Dr. Ramon Josa March
Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia
Escola Superior d'Agricultura de Barcelona
ESAB- UPC

Castelldefels, desembre del 2006

TÍTOL: Efecte del Contingut de Graves en la Mesura d'Humitat amb TDR

AUTORA: Cristina Gonzàlez i Flor

PROFESSOR TUTOR: Dr. Ramon Josa March

RESUM:

Totes les empreses dedicades a les activitats extractives estan obligades a fer un programa de restauració (Llei 12/81) per reduir l'impacte mediambiental i paisatgístic que generen.

Per assegurar el subministrament d'aigua a les plantes introduïdes en una restauració, segons el clima i l'aigua que és capaç de retenir el sòl utilitzat, cal dur un seguiment del contingut d'aigua per regular el rec. El seguiment es fa amb el TDR (Reflectometria del Domini Temporal), ja que és un sistema que dona resultats fiables i precisos, que pertorba poc la zona a estudi i que permet instal·lar sondes per fer mesures localitzades.

Aquest treball és un estudi experimental de la tècnica del TDR aplicada en la mesura d'humitat d'un sòl arenós on s'hi ha anat afegint diferents continguts de graves. En un principi s'ha utilitzat la funció de calibració de Topp et al. (1980), però se sap que és molt general, ja que s'ha independitzat de la textura i estructura del sòl, de la salinitat i de la temperatura.

Com que el substrat per la restauració de pedreres es fa utilitzant el rebuig de l'activitat extractiva, l'estudi que s'ha dut a terme es centra en comprovar si existeix alguna variació en les mesures del TDR en un medi isotrop, però alhora heterogeni, per saber si és necessària una funció de calibració diferent quan es treballa en pedreres restaurades.

Fent una correlació entre les mesures preses amb el TDR i els valors d'humitat mesurats pel mètode de referència de pèrdua de pes a l'estufa fins a pes constant, s'ha trobat una nova funció de calibració per a l'ús del TDR en sòls amb graves.

MOTS CLAU: Mostres sintètiques, sòl pedregós, densitat aparent, restauració de pedreres.

TÍTULO: Efecto del Contenido de Gravas en la Medida de Humedad con TDR

AUTORA: Cristina González i Flor

PROFESSOR TUTOR: Dr. Ramon Josa March

RESUMEN:

Todas las empresas dedicadas a actividades extractivas están obligadas a hacer un programa de restauración (Ley 12/81) para reducir el impacto medioambiental y paisajístico que generan.

Para asegurar el suministro de agua a las plantas introducidas en una restauración, según el clima y el agua que es capaz de retener el suelo utilizado, hace falta llevar un seguimiento del contenido de agua para regular el riego. El seguimiento se hace con el TDR (Reflectometría del Dominio Temporal), puesto que es un sistema que da resultados fiables y precisos, que perturba poco la zona a estudio y que permite instalar sondas para hacer medidas localizadas.

Este trabajo es un estudio experimental de la técnica del TDR aplicada en la medida de humedad de un suelo arenoso donde se ha ido añadiendo diferentes contenidos de gravas. En un principio se ha utilizado la función de calibración de Topp et. al. (1980), pero se sabe que es muy general, puesto que se ha independizado de la textura y estructura del suelo, de la salinidad y de la temperatura.

Como el sustrato para la restauración de canteras se hace utilizando el rechazo de la actividad extractiva, el estudio que se ha desarrollado se centra en comprobar si existe alguna variación en las medidas del TDR en un medio isótropo, pero a su vez heterogéneo, para saber si es necesaria una función de calibración diferente cuando se trabaja en canteras restauradas.

Haciendo una correlación entre las medidas tomadas con el TDR y los valores de humedad obtenidos por el método de referencia de pérdida de peso a la estufa hasta peso constante, se ha encontrado una nueva función de calibración para el uso del TDR en suelos con gravas.

PALABRAS CLAVE: Muestras sintéticas, suelo pedregoso, densidad aparente, restauración de canteras.

TITLE: Effect of the Gravels Content in the Measurement of Water Content with TDR

AUTHORESS: Cristina González i Flor

TUTORIAL TEACHER: Dr. Ramon Josa March

ABSTRACT:

All the quarries exploitations companies have to apply a restoration program (Law 12/81) to reduce the landscape impact that they generate.

To assure the water supply to the introduced plants got in restoration, according to the climate and the porous media of substrate, it is necessary to take water content's control to regulate the irrigation. The control can be done by the TDR (Time Domain Reflectometry). It is a system that gives precise results; the disturbs at the study's zone are minimums and which it allows to install probes to do located measures.

This work is an experimental study of the TDR applied to measure the water content of a sand material where have been added different contents of gravels. In a beginning there has been used the function of calibration of Topp et. al. (1980), but it is known that it's very general, because it has been calculated without bearing in mind the texture and the structure of the soil, the salinity and the temperature.

The substratum for the restoration of quarries is done using the rejection of the extractive activity. The study that has developed has been centred on verifying if some variation exists in the measures of the TDR in a both isotropic and heterogeneous media, to know if there is necessary an specific function of different calibration when is employed at restored quarries.

Doing a correlation between the measures taken with the TDR and the values of water content obtained by the reference method, has found a new function of calibration for the use of the TDR in soils with gravels.

KEY WORDS: Synthetic samples, stony soil, bulk density, quarry restoration.

Agraïments

Aquesta primera plana la vull destinar a agrair amb tota sinceritat a les persones que, d'una o altra manera, m'han ajudat a donar-li forma al meu Treball Final de Carrera

Primer de tot, em veig amb la profunda necessitat de donar-li les gràcies al Dr. Ramon Josa March per haver dirigit aquest treball amb tant d'entusiasme. Valoraré sempre la paciència que ha mostrat en tot moment, fins i tot quan, sense voler-ho, s'havia de canviar el rumb del treball.

L'agraïment més especial va destinat "a la meva gent": al Darío, a la Marta i a la meva mare. Al Darío per estar des de fa dos anys sempre al meu costat, tan en els bons com en els mals moments, i haver-me ensenyat a veure la vida des d'altres punts de vista. A la Marta per haver-me acompanyat tota la vida i, encara que ens veiem menys, segueix sent la meva bessoneta preferida. A la meva mare perquè és ella qui m'ho escolta tot i qui sempre està per ajudar-me a tirar qualsevol cosa a endavant. Gràcies als tres per aguantar les meves dèries i els meus estressos aquestes últimes setmanes.

Agraeixo també al Dr. Carles Rubio per la visita a les pedreres i per les seves explicacions i consells en moments puntuals. Encara que no ho sàpiga, m'ha servit de molta ajuda.

No vull acabar aquest escrit sense donar les gràcies a la Yomary Velásquez, pels bons moments que hem passat, i passarem, juntes dins i fora de l'Escola. Yomary, encara ens queda molt camí per fer a les dues.

Aquest TFC s'ha fet en col·laboració amb el projecte EcoQuarry Life04 ENV/ES/000195.

Índex

0. Agraïments	
1. Introducció	2
1.1. Les activitats extractives a Catalunya	3
1.2. Llei 12/81 i la restauració de les pedreres	3
1.3. Restauració integrada de les pedreres	4
1.4. Seguiment de la vegetació en pedreres restaurades	5
1.5. Mètodes de mesura d'humitat del sòl	5
1.6. Introducció al TDR	6
1.7. Ecotecnologia mediambiental per a la restauració de pedreres de calcària	8
1.8. Relació entre contingut d'aigua i permetivitat	10
1.9. Aplicació del TDR en sòls de pedreres restaurades	10
2. Objectius	12
3. Material i mètodes	14
3.1. Materials	15
3.1.1. Mostres sintètiques	15
3.1.1.1. Arena	16
3.1.1.2. Graves	16
3.1.1.3. Preparació de les mostres sintètiques	16
3.1.2. Equips de mesura	17
3.1.2.1. Oscil·loscopi Tektronix 1502C Metallic TDR Cable Tester	17
3.1.2.2. Sonda de tres barres	18
3.1.2.3. Concepte de permetivitat elèctrica	19
3.1.2.4. Funcionament del TDR	20
3.1.3. Materials de suport	21
3.2. Disseny de l'experiència	23
3.3. Mètodes de mesura	24
3.3.1. Humectació de les mostres sintètiques	24
3.3.2. Mesura d'humitat volúmica pel mètode TDR	24

3.3.3.	Humitat volúmica pel mètode de referència (MR)	27
3.3.3.1.	Humitat higroscòpica	28
3.3.4.	Densitat aparent	28
3.3.5.	Tractament estadístic de dades	29
4.	Resultats	32
4.1.	Densitat Aparent	33
4.2.	Humitat pel Mètode de Referència	34
4.3.	Humitat pel Mètode de TDR	35
4.4.	Control de qualitat de les mostres sintètiques	36
5.	Discussió de resultats	38
5.1.	Relació entre elements grossos i densitat aparent	39
5.2.	Relació entre les mesures de TDR i MR	40
5.2.1.	Resposta de l'arena	40
5.2.2.	Comportament dels substrats	42
5.2.3.	Efecte del contingut d'aigua sobre la relació TDR/MR	44
5.3.	Anàlisi de qualitat dels resultats	45
5.4.	Resposta del TDR segons el contingut de graves	48
5.5.	Relació entre el contingut d'aigua MR i la permitivitat elèctrica	49
5.5.1.	Relació entre humitat TDR calculada amb Topp et al. (1980) i amb la Correlació experimental	51
5.5.2.	Relació entre funció de Correlació Experimental i Topp et al. (1980)	51
6.	Conclusions	54
7.	Bibliografia	57
8.	Annexes	62
Annex I.	Annex de dades: Mesures TDR i MR	63
Annex II.	Annex de resultats: Densitat aparent	81
Annex III.	Annex de resultats: Ajust lineal	84
Annex IV.	Annex de resultats: Ajust polinòmic	89

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Les activitats extractives a Catalunya

Els catalans estem consumint vint-i-dos quilograms de pedra al dia¹. Això converteix l'àrid en el recurs més consumit en el nostre país, després de l'aigua. Aquest valor ve donat pel desenvolupament de infraestructures de cada zona. A l'Amèrica Central el consum d'àrid és de 4 kg per persona al dia, en canvi a Alemanya aquest valor és de 29. És doncs, un indicador del desenvolupament econòmic i social de cada país.

L'àrid és una matèria prima mineral que s'extreu del subsòl i que es passa per diferents processos de trituració i classificació per a que pugui ser utilitzat. Actualment l'extracció d'àrids del terra es fa creant pedreres a cel obert.

Els recursos que s'exploten són molt diversos. Es troben distribuïts geogràficament arreu del país, fet que ha provocat que a l'actualitat les activitats extractives ocupen al voltant d'un 0.28 % de la superfície de Catalunya a l'any 1996 (Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya).

1.2. Llei 12/81 i la restauració de les pedreres

Les explotacions a cel obert causen un fort impacte mediambiental i paisatgístic. La situació d'aquest tipus d'explotacions, la distribució geològica del material que s'hi extreu, l'àrea d'afectació i els usos, la durada de l'activitat i la coberta del sòl anteriors a l'explotació són factors determinants de la importància que pot prendre aquest impacte ambiental.

¹ Dades extretes de la compareixença del Sr. Pascual Roca Riera, president del Gremi d'Àrids de Catalunya des del 1979 al 1985 i des del 2004 al 2006, al Parlament de Catalunya. (Diari de Sessions del Parlament de Catalunya. VII legislatura, tercer període. Sèrie C- Número 121. Dimecres, 1 de desembre del 2004).

L'any 1981 el Parlament de Catalunya, conscient de la importància de la protecció del medi ambient, va aprovar la primera normativa específica de l'Estat espanyol dedicada a la protecció i a la restauració dels espais afectats per activitats extractives: la Llei 12/81. La nova legislació, doncs, obligava a totes les empreses dedicades a les activitats extractives a fer un programa de restauració.

El principal objectiu del programa de restauració és el de retornar el terreny afectat per una explotació als usos inicials o adequar-lo a les noves necessitats del territori.

Això implica que abans del començament de l'activitat, les empreses han de tenir aprovat un programa de restauració i han de dipositar una important quantitat de diners com a fiança per a garantir que aquesta tasca es durà a terme.

1.3. Restauració integrada de les pedreres

A les zones d'extracció d'àrid es fa el que s'ha anomenat una "restauració integrada de les pedreres". Això significa que a mesura que es va avançant l'extracció, les zones on ja explotades comencen el procés de restauració, aprofitant els moviments de terra que genera la mateixa activitat extractiva. D'aquesta manera la societat té la percepció que la restauració és un fet real i disminueixen les oposicions al projecte.

Es du a terme una reimplantació de la vegetació sobre un substrat que ha de presentar una qualitat suficient per permetre-li el desenvolupament vegetal. Aquest substrat està fet a partir de la barreja del rebuig de l'extracció i de la trituració de pedra, amb algun material orgànic que garanteixi el subministrament als vegetals de nitrogen, fòsfor i altres nutrients.

1.4. Seguiment de la vegetació en pedreres restaurades

A les pedreres ja restaurades s'ha d'assegurar el subministrament d'aigua a les plantes introduïdes tenint en compte la climatologia de la zona on s'ha fet la restauració, l'interès d'instal·lar-hi recs de suport per cobrir-ne les necessitats hídriques en qualsevol moment i el substrat sobre el que hauran de desenvolupar-se, generalment format pel rebuig de la trituració de les pedreres. Cal afegir al substrat esmenes per millorar la seva capacitat de retenció d'aigua i la seva fertilitat (Josa et al., 2006).

La pluja o les aigües de rec de suport tenen una efectivitat limitada degut a la baixa capacitat dels sòls per retenir l'aigua temporalment. Cal tenir en compte que la superfície específica de cada material és diferent, pel que variarà la capacitat del sòl d'emmagatzemar aigua. A mesura que s'augmenta la presència de graves, disminuirà la superfície específica total i, per tant, l'aigua capaç de retenir també serà menor.

Per aquest motiu s'ha de fer un seguiment del contingut d'aigua per poder regular el rec segons el clima i fent un control de l'aigua que és capaç de retenir el sòl utilitzat per la restauració, per tal d'evitar que les plantes pateixin estrès hídrics.

1.5. Mètodes de mesura d'humitat del sòl

El control de la humitat del terra és pot dur a terme amb un seguit de metodologies diferents. Els mètodes directes són aquells que mesuren directament la quantitat d'aigua que hi ha al sòl. En canvi, els mètodes indirectes són aquells que calculen la humitat mitjançant la relació entre el contingut d'aigua i una alguna propietat més senzilla de mesurar. També és important que són tècniques no destructives.

El mètode directe més utilitzat és el mètode gravimètric o de referència. Es tracta de mesurar, d'una mostra de volum conegut, la pèrdua de pes que ha sofert a l'estufa fins a pes constant. És el mètode més exacte de tots, per això és el que s'utilitza per calibrar-ne els altres. El principal inconvenient que presenta aquest sistema és la quantitat de temps del que requereix i el fet que no es pugui tenir el resultat *in situ*.

Dins els mètodes indirectes es troben tensiòmetres, sicròmetres, la sonda de neutrons, la sonda de raigs gamma o els blocs de guix, entre d'altres. Aquests sistemes de mesures presenten moltes limitacions que fan que el seu ús habitual com a mètode de mesura de contingut d'aigua al sòl es vegi poc estès.

També, dins el grup dels indirectes, existeixen els anomenats "mètode de mesura de propietats elèctriques i dielèctriques del medi". Aquí s'hi pot trobar tècniques tals com el GPR (Ground Penetrating Radar) o el dispositiu TDR (Reflectometria en el Domini Temporal). Aquest darrer és mètode que s'utilitzarà en aquest estudi.

1.6. Introducció al TDR

Els inicis del TDR s'ha de buscar a principis del segle XX. Smith Rose (1933 i 1935) fa els primers estudis en que es relaciona la permetivitat d'un medi, que és una mesura d'expressió de resistència al pas de les ones, amb el contingut d'aigua que presenta. Altres grups de geòlegs i físics també s'endinsen en aquests àmbits.

Tot i això, aquells professionals no van disposar de la instrumentació necessària per fer ús dels nous coneixements. No va ser fins a la Segona Guerra Mundial on es van utilitzar extensament l'ús de mesures elèctriques d'alta freqüència² i es comença a ampliar la investigació en aquest camp.

² Informació extreta de l'article 'Robinson, D.A.; Jones, S.B.; Wraith, J.M.; Or, D. i Friedman, S.P. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, 2003, vol. 2, núm. 4, p. 444-475'.

Als 60s comencen a desenvolupar-se estudis i emergeixen dos camins per a fer mesures de la permitivitat elèctrica. Un d'ells són les sondes capacitatives que es poden construir amb petits components elèctrics d'alta freqüència i s'utilitzaven per a fer mesures rutinàries.

L'altre camí el va suggerir Feldegg (1969), deia d'utilitzar la reflectometria del domini temporal (TDR) per mesurar la permitivitat. Aquest camí és el que va prendre's per part dels estudiosos de ciències del sòl. El TDR redueix considerablement les interferències en les senyal i les pertorbacions sobre el medi d'estudi, si es compara amb les sondes capacitatives. Fellner i Feldegg (1969) van ser els primers en fer mesures de dielèctric en solucions orgàniques utilitzant el TDR.

D'entre les claus de l'èxit que té el dispositiu TDR es pot destacar:

- Dóna resultats fiables en qualsevol profunditat del sòl.
- En molts sòl no és necessari calibrar-lo.
- No allibera cap radiació perillosa.
- Provoca una mínima pertorbació al sòl.
- Fa mesures localitzades i instantànies.
- Baixa susceptibilitat a interferències del senyal
- És una tècnica idònia per automatitzar.

El principal inconvenient que presenta aquest mètode és l'elevada inversió inicial que s'ha de fer per adquirir-lo³.

1.7. Ecotecnologia mediambiental per a la restauració de pedreres de calcària

³ Informació extreta de:

Laboratorio de investigación Suelo-Agua- Planta. Universidad de Chile
"Medición del contenido de humedad en el suelo" (2005) [en línia]
www.sap.uchile.cl/docencia/SAP/MEDICION1.PDF [10/11/06 9:30]

Des de l'any 2004 es du a terme a Catalunya el projecte "Ecotecnologia mediambiental per a la restauració de pedreres de calcària" coordinat per la Universitat de Barcelona, dins el programa Life de la Unió Europea.

Els objectius principals⁴ del projecte són:

- Implementar a escala real les últimes innovacions en restauració de pedreres en condicions mediterrànies.
- Obtenir una millora en els resultats de les intervencions de restauració desenvolupant processos de control de qualitat estandarditzats.
- Fomentar un ús racional i sostenible dels recursos naturals, i un increment de la fixació del carboni.
- Transferir directament els procediments a grans i petites empreses del sector extractiu.

Des del Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia de la Universitat Politècnica de Catalunya, dins del projecte esmentat, es fa un control de les variacions d'humitat del substrat en 8 pedreres de calcària que estan en funcionament pel territori català, per tal d'assegurar el creixement vegetal en les zones restaurades i per optimitzar l'ús de l'aigua de rec.

Per fer-ho s'ha triat el dispositiu TDR perquè es buscava un sistema que donés resultats fiables i precisos, que pertorbés el mínim possible la zona a estudi i que permetés la instal·lació de sondes en punts concrets per poder fer mesures localitzades i instantànies i, d'aquesta manera, fer un seguiment de les variacions d'humitat en el temps.

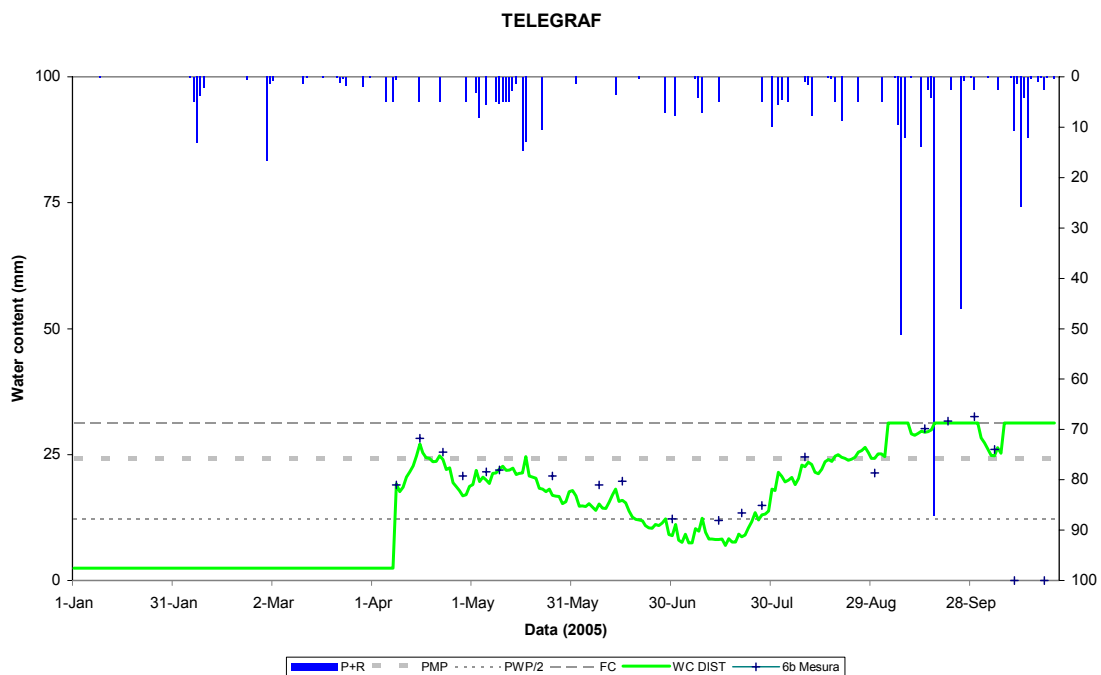
⁴ Informació extreta del tríptic "EcoQuarry. Ecotecnologia mediambiental per a la restauració de pedreres de calcària".

A totes les pedreres sotmeses a l'estudi s'hi van instal·lar un seguit de sondes de TDR. Setmanalment es va a camp, es connecten cadascuna de les sondes al dispositiu TDR i s'hi pren la mesura de permetivitat.

Tot seguit es mostra una gràfica (Figura 1.1) feta a partir de les dades recopilades a la pedrera El Telègraf del terme municipal de l'Ordal.

Les barres blaves representen la quantitat d'aigua caiguda en precipitacions a la zona restaurada. Les creus corresponen totes les dades de humitat del sòl mesurades amb el TDR. La línia verda mostra el contingut *real* d'aigua al sòl, obtingut a partir de la interpolació de les dades preses amb el TDR i la precipitació sobre la zona.

Figura 1.1. Evolució de la humitat del sòl mesurada amb TDR i de les precipitacions a la pedrera El Telègraf (T. M. de l'Ordal).



Font: Comunicació personal R. Josa

1.8. Relació entre contingut d'aigua i permetivitat

Com que la constant dielèctrica de l'aigua és molt superior a la de la fase sòlida i l'espai porós del sòl (la constant dielèctrica de l'aire és 1, la de la majoria dels sòls minerals varia entre 3 i 5, i la de l'aigua a 20°C és 81), les petites variacions en la humitat provoquen canvis en la permetivitat⁵.

Topp et al. (1980) van relacionar empíricament els valors de permetivitat elèctrica que donava el dispositiu TDR amb el contingut real d'aigua al sòl. Van proposar una equació vàlida per a fer les mesures en medis porosos. Tot i que existeixen altres funcions de calibració, aquesta s'ha establert com l'equació de referència sempre que es fa ús del TDR

1.9. Aplicació del TDR en sòls de pedreres restaurades

L'equació de Topp et al. (1980), però, ha resultat ser molt general com per ser utilitzada com a funció de referència, ja que s'ha independitzat de la textura i l'estructura del sòl (Kim et al., 2000), de la salinitat que presenta i de la temperatura. Els models empírics no representen l'efecte de la deformació sobre la mesura de contingut d'aigua, sinó que les variacions depenen del temps de viatge de l'ona per zones de la sonda exposades a l'aire.

Per aquest motiu i pel fet que el substrat per a la restauració de les pedreres es fa utilitzant el rebuig de l'activitat extractiva, es du a terme un estudi per comprovar si existeix alguna variació en els resultats provocada per la presència de pedres en el medi, ja que hi ha una variació en la granulometria del sòl. D'aquesta manera es podrà determinar si és necessari utilitzar una equació de calibració diferent per relacionar constant dielèctrica i humitat del sòl quan estiguem treballant amb el TDR en les pedreres restaurades.

⁵ Informació extreta de l'article 'Regalado, C.M.; Muñoz Carpena, R.; Socorro, A.R. i Hernández Moreno, J.M. Por qué los suelos volcánicos no siguen la ecuación de Topp? *V Jornadas de Investigación en la Zona No Saturada del Suelo*, Universidad de Navarra.'

Topp et al. (1980) van trobar la seva equació utilitzant un medi isotròpic, es tracta d'un medi porós que presenta les mateixes propietats físiques en totes les direccions. Però, a diferència del que s'ha desenvolupat en aquest treball, en el seu estudi van desenvolupar les seves proves en medis homogenis. L'estudi que es presenta s'ha fet utilitzant el que s'ha anomenat "mostres sintètiques", fruit de la barreja d'arena de platja amb graves procedents d'una pedrera de pedra calcària.

S'està treballant, doncs, d'un medi isòtrop, però alhora heterogeni.

2. OBJECTIUS

L'objectiu general d'aquest treball és estudiar l'aplicació de la Reflectometria del Domini Temporal (TDR), en medis porós en condicions de contenidor al laboratori.

Es pretén saber quina és la resposta del dispositiu TDR enfront a:

- Medi isòtrop, homogeni: arena de platja.
- Medi isòtrop, però heterogeni: arena de platja amb graves, en diferents quantitats.

Primer de tot es busca la relació entre el contingut d'aigua mesurada pel mètode de referència -a l'estufa fins a pes constant- i l'obtinguda amb el TDR, on s'hi ha aplicat l'equació de Topp et al. (1980).

El segon objectiu marcat és proposar una funció de calibració polinòmica de tercer grau per a sòls on hi ha diferents continguts de graves. Això dependrà de les divergències entre les dades donades pel TDR i les mesures obtingudes pel mètode de referència.

3. MATERIAL I MÈTODES

3.1. Materials

Per a dur a terme el treball de laboratori s'han utilitzat:

- 1- Mostres sintètiques que son l'objecte d'estudi
- 2- Equips de mesura
- 3- Materials de suport

3.1.1. Mostres sintètiques

Les mostres sintètiques per a fer l'estudi han estat fetes amb diferents proporcions de la barreja d'arena i grava en les diferents proporcions previstes.

Taula 3.1. Proporció d'arena i grava utilitzades per augmentar la presència d'elements grossos a les mostres, expressat en percentatges sobre pes.

Arena $\varnothing < 1 \text{ mm}$	Grava $\varnothing > 8 \text{ mm}$
100%	0%
99%	1%
98%	2%
95%	5%
90%	10%
73%	27%
54%	46%
45%	55%

3.1.1.1. Arena

L'arena utilitzada es va aconseguir a la platja de Castelldefels. Un cop al laboratori es va assecar a l'aire i es va fer passar per tamisos de diferent llum per anar retirant els elements grossos no desitjats i determinar quin diàmetre era el representatiu per a l'estudi. Alhora, es va comprovar que hi havia prou quantitat per a les distintes rèpliques a fer. Es va avaluar la quantitat d'arena bruta necessària en funció del disseny experimental (rèpliques, contenidors i nivells d'humitat).

Finalment l'arena utilitzada té un diàmetre equivalent inferior a 1 mm

3.1.1.2. Graves

La grava que hem fet servir per a la inclusió d'elements grossos a la mesura d'humitat venen de la pedrera El Telègraf (T.M. de l'Ordal), on es fa extracció de roca calcària per a transformar-la en àrids de construcció.

De tot el material calcari agafat a la pedrera s'ha seleccionat les graves amb diàmetres entre 8 i 13 mil·límetres, mitjançant l'ús de sedassos, per tenir grava de diàmetre bastant diferenciat de l'arena i en prou quantitat per a totes les rèpliques i continguts de graves.

3.1.1.3. Preparació de les mostres sintètiques

Com que l'objectiu del treball és el de comprovar la variació en la permitivitat elèctrica mesurada amb el TDR (Reflectometria del Domini Temporal) i la humitat volúmica que conté el material a mesura que s'hi afegeixen elements grossos, es decideix que es farà un augment progressiu del contingut en graves en cada contenidor.

S'agafa el pes corresponent d'arena i es barreja amb el pes corresponent de graves. Tot el material es passa per l'homogeneïtzador de mostres tres cops, de forma que s'obté una mostra uniforme.

3.1.2. Equips de mesura

L'aparell de mesura emprat per l'estudi consta de dues parts:

- Oscil·loscopi Tektronix 1502C Metallic TDR Cable Tester.
- Sonda de tres barres
- Ecòmetre.

3.1.2.1. Oscil·loscopi Tektronix 1502C Metallic TDR Cable Tester

El TDR és un aparell que funciona amb corrent elèctric (o amb una bateria recarregable) que està adaptat per a que mesurés el contingut d'aigua (Hoekstra and Delaney, 1974; Topp et al., 1980) i la Conductivitat Elèctrica (Dalton et al., 1984) del sòl simultàniament.

L'aparell emet un tren d'ones electromagnètiques cap a la sonda. Els canvis en la impedància en el cable refracten una part de l'energia de la pulsació que torna cap a l'oscil·loscopi. Les refraccions són emeses en forma de gràfic en la pantalla del TDR. Amb les dades, es pot saber quin és el retard de la ona i , per tant, la llargada aparent de la sonda.

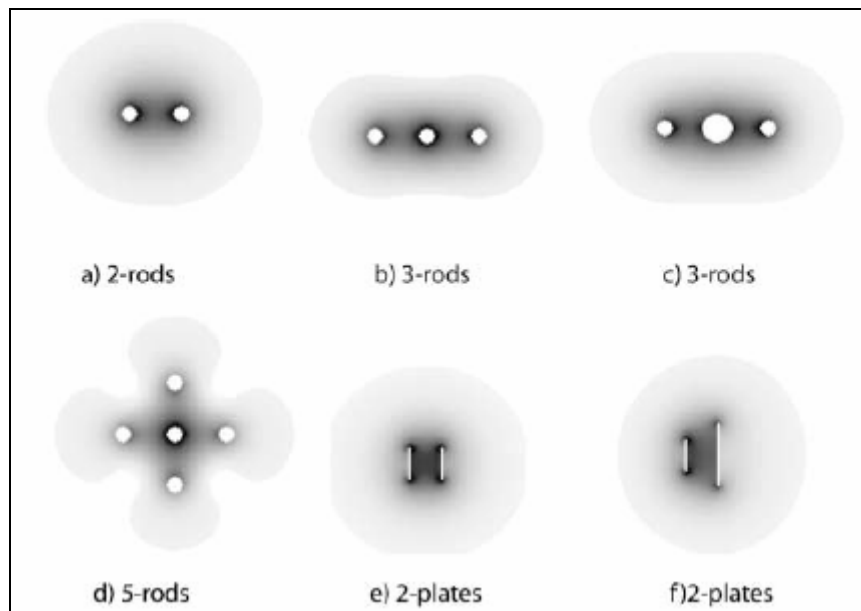
3.1.2.2.Sonda de tres barres

La sonda no pot ser massa curta si es vol fer una mesura precisa. La llargada mínima recomanada és de 10cm. De la mateixa manera, Spittlehouse, D. L. (2000) diu que en sòls rocosos el contingut d'aigua mesurat amb TDR dóna resultats més precisos si es mostreja amb sondes de dues barres.

Igualment, cal tenir en compte, a l'hora de fer mesures, el volum de mostreig que utilitza la sonda per a propagar les ones. Ferre et al. (1998) defineixen volum de mostreig com la regió de material porós que contribueix a la mesura, de manera que canvis externs no provoquin impactes significatius a la resposta del TDR.

L'estudi que es presenta s'ha fet amb una sonda de tres barres, amb una llargada cadascuna de 200 mm. La sonda consta d'un suport de reina on hi ha fixades les barres. Cadascuna fa 3 mm de secció cadascuna i estan separades entre sí per 30 mm.

Figura 3.1 . Distribució de densitat d'energia en el volum de mostreig per a diferents models de sondes. Les zones més fosques representen les que tenen més energia emmagatzemada.



Font: Robinson, D. A.; Jones, S. B.; Wraith, J. M.; Or, D. i Friedman, S. P. A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry. *Vadose Zone Journal*, 2003, vol. 2, p. 444-475.

Figura 3.2. Imatge de l'Oscil·loscopi Tektronik 1502C Metallic TDR Cable Tester en el moment de mesura, amb la sonda de tres barres submergida en un contenidor de mostra sintètica.



3.1.2.3. Concepte de permitivitat elèctrica

La permitivitat elèctrica és una “ propietat física dels materials que descriu com un camp elèctric afecta i és afectat per un medi. És l’habilitat d’un material per polaritzar-se en resposta a un camp elèctric aplicat i, d’aquesta manera, cancel·lar parcialment el camp dins del material”⁶.

La permitivitat varia segons la freqüència, la temperatura, el contingut d’aigua o el contingut de sals, entre d’altres. Per aquest motiu es va buscar un dispositiu que relacionés la permitivitat amb la humitat del medi.

⁶ Definició obtinguda a Wikipedia. La enciclopedia libre

“Permitividad” [en línia]

<http://es.wikipedia.org/wiki/Permitividad> [17/11/06]

3.1.2.4. Funcionament del TDR

L'ecòmetre és l'encarregat d'aplicar uns voltatges als conductors. Els senyals es propaguen pels sensors de TDR (línies de transmissió) i són refractats des del final de la sonda. El retorn del senyal és mostrejat per l'oscil·loscopi.

La freqüència de treball del dispositiu TDR és d'entre 20 kHz i 1.5 GHz (Heimovaara, 1994). La qualitat de l'equip de mesura, la permitivitat del dielèctrica i les seves pèrdues, tal com la geometria de la sonda, poden influir en aquest rang.

La velocitat de propagació de l'ona depèn de la composició mineral (fase sòlida), la quantitat d'aire contingut als porus (fase gasosa) i el volum d'aigua present (fase líquida). D'aquestes tres fases, la líquida és la que presenta una major impedància electromagnètica⁷ fet que provoca una major influència dels líquids sobre la propagació de l'ona en el medi.

El TDR fa una mesura del temps de viatge, que és una funció de les propietats electromagnètiques dels materials a través del que passa. Aquest valor varia segons la temperatura, el contingut d'aigua, la quantitat de sals, etc (Campbell, 1990; Scott y Smith, 1992; Robinson et al., 1999).

Com que es coneix la velocitat amb la que viatja l'ona (equival a la velocitat de propagació de la llum, $c = 3 \cdot 10^8$ km/s), el mateix dispositiu dona com a resultat dues ones que representen la distància aparent que ha hagut de recórrer des de la barra emissora fins la receptora. Amb el TDR, per tant, s'obté la longitud aparent de la sonda.

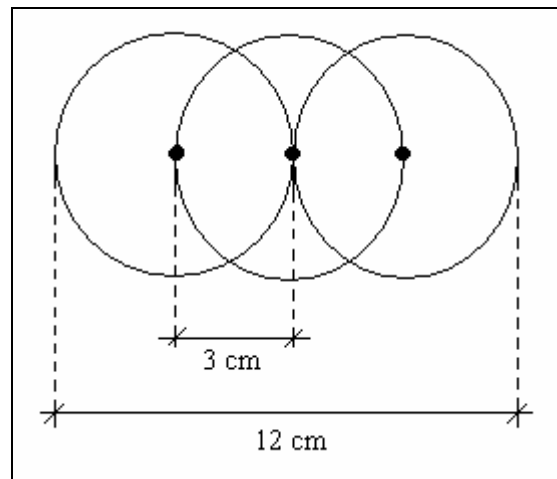
⁷ Impedància electromagnètica es defineix com la relació entre l'amplitud del camp elèctric respecte del magnètic. Les seves unitats en el Sistema Internacional són els Ohms.

3.1.3. Materials de suport

Els materials que s'han requerit a l'hora de dur a terme l'experiència de laboratori han estat els descrits a continuació:

- Contenedors: han estat triats de manera que hi cabés bé la sonda de tres barres dins, tenint en compte que la zona amb energia emmagatzemada pel material porós és de radi semblant a l'espai entre barres i per tant ha de tenir, en aquest cas, una amplada mínima de 12 cm (Fig. 3.3). A part, calia que s'hi poguessin fer tres mesures consecutives, sense que el buit deixat en l'anterior afectés a la nova mesura. Passa el mateix amb la profunditat. Com que les barres de la sonda tenen una llargada de 20 cm, el contenidor haurà de tenir una profunditat superior.

Figura 3.3. Esquema del radi de mesura on arriba l'ona electromagnètica respecte les tres barres de la sonda.



Així que han calgut 5 contenidors de 0.15m d'ample per cada costat i 0.26m de profunditat. El material del contenidor ha estat prou rígid per a que no es deformi fàcilment quan s'hi afegeix la sorra i s'assenta.

- 77 safates d'alumini i 9 recipients de vidre per l'asseca de les mostres a l'estufa.
- Balança amb precisió de 10 mg per a la pesada de les mostres que van a l'estufa, pel càlcul de la humitat pel mètode de referència.
- Balança amb precisió de 10 grams per a la pesada dels contenidors i de la grava a afegir en cada nou contingut de graves.
- 60 L aproximadament d'aigua destil·lada, a part de la que s'ha utilitzat per a la neteja de les safates i d'altres materials.
S'ha emprat aigua destil·lada ja que se sap que la presència de sals fa variar la mesura de permetivitat elèctrica dels materials, i per tant, les dades que ens donaria el TDR poden ser errònies.
- Un rasclet i una pala per fer les barreges corresponents i per omplir els contenidors.
- Bac de plàstic de 0.5 m de diàmetre on s'han fet les barreges.
- Homogeneïtzador per repartir les graves el més homogeniament possible en l'arena.
- Estufa per assecar les mostres a 105 °C.
- 10 càpsules de porcellana per a la mesura d'humitat higroscòpica.
- 2 dessecadors amb capacitat per a 5 càpsules de porcellana.

3.2. Disseny de l'experiència

Per facilitar la planificació del treball es van establir uns “nivells d’humitat” orientatius per tal de tenir la referència del volum d’aigua que calia afegir. Inicialment es va tenir en compte els nivells: 0, 5, 10, 15, 20, 25 i 30. A mesura que s’augmenta el contingut de graves de les mostres sintètiques la porositat ha disminuït, de manera que s’ha hagut d’anar reduint la quantitat d’aigua per obtenir mesures correctes i coherents. Els nous nivells d’humitat han estat: 17, 23 i 27.

Per a saber l’aigua a afegir en cada contenidor s’ha utilitzat el següent fórmula:

$$V_{H_2O}(L) = V_c(L) \cdot NH \left(\frac{L}{L} \right)$$

on V_{H_2O} i V_c corresponen el volum d’aigua necessària i el volum del contenidor, respectivament; i NH correspon el valor de *nivell d’humitat* expressat en tant per u.

Taula 3.2. Volum d’aigua a afegir per obtenir els nivells d’humitat prefixats segons els volum dels contenidors.

Contenidor	(vol/vol)	Nivell d’humitat desitjada								
		5 %	10 %	15 %	17%	20 %	23%	25 %	27%	30 %
nº	Volum (L)	Volum d’aigua a afegir (dL)								
1	5.09	25.5	50.9	76.4	86.5	101.8	117.1	127.3	137.5	152.7
2	5.09	25.5	50.9	76.4	86.5	101.8	117.1	127.3	137.5	152.7
3	5.08	25.4	50.8	76.2	86.4	101.6	116.9	127.0	137.2	152.4
4	5.11	25.6	51.1	76.7	86.4	102.2	117.6	127.8	138.0	153.3
5	5.08	25.4	50.8	76.2	86.4	101.6	116.9	127.0	137.2	152.4

En les primeres proves que es van desenvolupar al laboratori es va comprovar que quan s'afegeix l'aigua a la sorra, aquesta es va infiltrant lentament cap avall i la seva distribució acaba per ser desigual en el contenidor. Aquest fet pot provocar errors importants tant en la mesura de la permetivitat com en la presa de mostra per obtenir la humitat pel mètode de referència. Això ha comportat un canvi del mètode d'humectació de les mostres.

3.3. Mètodes de mesura

3.3.1. Humectació de les mostres sintètiques

El procés d'humectació de les mostres s'ha fet seguint els *nivells d'humitat*. S'ha fet abocant la mostra sintètica i l'aigua predeterminada al bac. Allí, amb l'ajuda d'una paleta es barreja tot, fent que quedi el més homogeni possible per aconseguir una millor precisió en les mesures.

L'addició de l'aigua destil·lada als contenidors s'ha fet amb l'ajut d'una proveta de 1000 mL, tenint en compte el volum a afegir segons els nivells d'humitat previstos i el volum d'aigua continguts de la mesura anterior.

3.3.2. Mesura d'humitat volúmica pel mètode TDR

Per a prendre la humitat volúmica mitjançant el dispositiu TDR s'utilitza l'oscil·loscopi Tektronik 1502C Metallic TDR Cable Tester connectat a la sonda de tres barres.

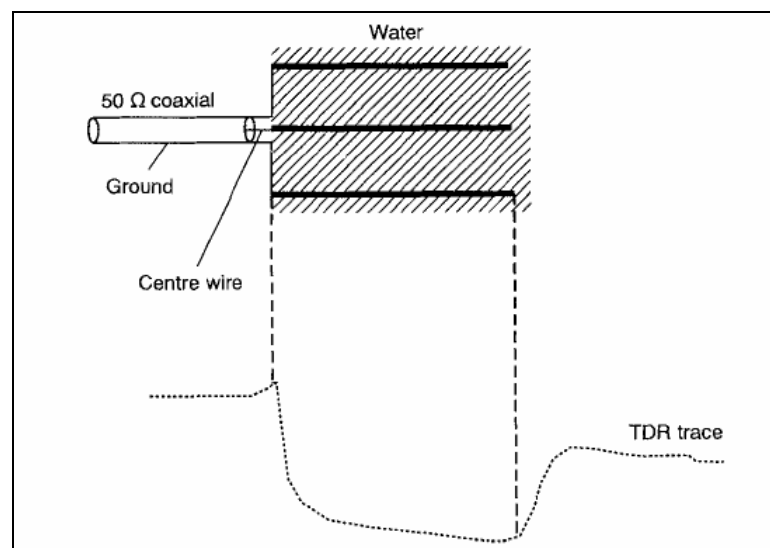
La instal·lació de les sondes és una qüestió important. S'ha de col·locar intentant causar la mínima pertorbació al sòl. El TDR és molt sensible a efectes d'instal·lació perquè el volum de mostreig es torna més compacte a prop de les barres de la sonda. Simplement empènyer la sonda al sòl implica una reducció significativa del contingut d'aigua. Això s'accentua més en saturació del sòl, ja que aquesta compressió afecta més als porus grans (Rothe et al., 1997).

La sonda es pot col·locar en horitzontal i en vertical al sòl. En horitzontal normalment es fa per obtenir una millor resolució en profunditat. La sonda en vertical es pot utilitzar amb molta precisió per seguir el procés d'infiltració dins el sòl (Timlin i Pachepsky, 2002).

Es fan tres mesures per cada contenidor, és a dir 15 mesures per nivell de graves i nivell d'humitat.

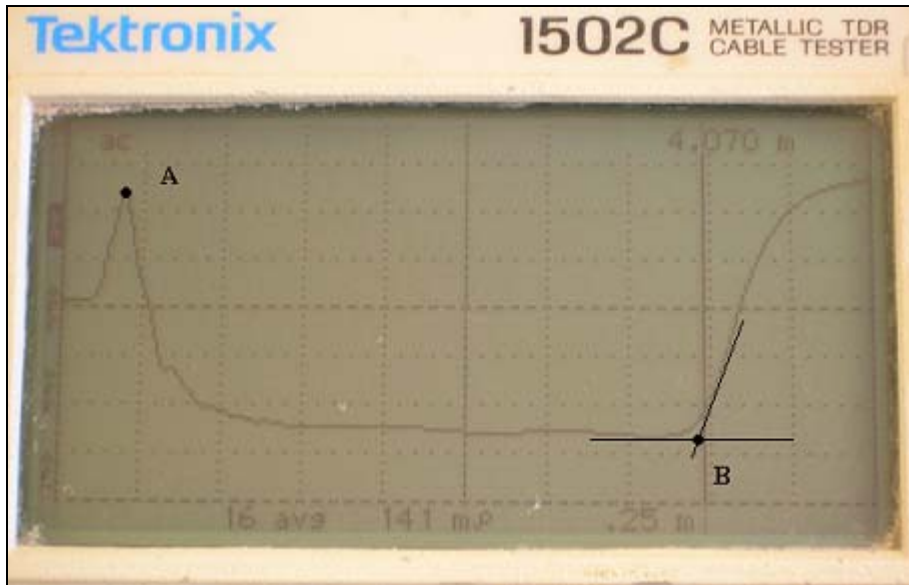
Els diagrames emesos pel TDR mostren el temps des del punt *A* i *B*. *A* correspon a la primera refracció deguda a la impedància que es troba l'ona al punt d'entrada del sensor al sòl quan va cap a la barra receptora. Com que sempre s'agafa el mateix sensor i el cable és igual de llarg, aquest punt *A* sempre és el mateix. El punt *B* correspon a la segona refracció, la del final de la barra emissora, i varia segons el contingut d'aigua.

Figura 3.5. Imatge de l'ona emesa pel TDR respecte les refraccions en cada punt de les barres de la sonda.



Font: Whalley, W. R. Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. *Journal of Soil Science*, 1993, vol. 44, p. 1-9.

Figura 3.6. Imatge de la gràfica mostrada per l'oscil·loscopi Tektronix 1502C Metallic TDR Cable Tester. El punt A correspon al retorn des de l'inici de les barres de la sonda i el punt B correspon al retorn des del final de les barres.



Es fa la diferència dels valors obtinguts en A i B per treure'n la longitud aparent de la sonda. La permitivitat elèctrica correspon a la relació entre la longitud aparent sobre la real, al quadrat.

A partir dels valors obtinguts del punt A i B, i coneixent la distància real de les barres (18.4 cm), es calcula la constant dielèctrica del medi (ϵ):

$$\epsilon_r = \left(\frac{l_a}{l_r} \right)^2$$

on ϵ_r és la permitivitat del material, l_a correspon a la longitud aparent de viatge de l'ona i l_r és la longitud real de la sonda.

$$\epsilon_r = \left(\frac{A - B}{l_r} \right)^2$$

on B és la distància a la segona refracció i A és la distància a la primera.

Topp et al (1980) va formular una equació empírica (equació 1) en que es relaciona la constant dielèctrica amb la humitat volúmica del sòl per a tots els materials porosos. Aquesta equació tendeix a subestimar el contingut d'aigua (Kim et al., 2000).

$$\theta = - 5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \varepsilon_r - 5.5 \cdot 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \varepsilon_r^3 \quad (1)$$

on θ correspon al valor de contingut d'aigua volúmic del sòl (m^3/m^3).

3.3.3. Humitat volúmica pel mètode de referència (MR)

S'ha considerat com a mètode de referència (MR) la mesura la quantitat d'aigua que hi ha en una mostra mitjançant la diferència per pèrdua de pes a 105°C fins a volum constant, al voltant de 24 hores (MAPA, 1994).

Després d'haver afegit l'aigua a la mostra sintètica, se n'agafa una part amb l'ajut d'una paleta, es col·loca en un recipient tarat i es pesa el més ràpid possible per evitar pèrdues del contingut hídic. Tot seguit es porta a l'estufa a 105°C i al cap de 24 hores es retira. Es deixa reposar dues hores per a que la mostra absorbeixi la humitat ambiental.

Per tant, totes les mesures de contingut d'aigua pel mètode de referència s'han referit sempre a la humitat de la mostra assecada a l'aire. Per a que el valor mesurat amb TDR (aigua afegida més humitat higroscòpica) es pogués relacionar amb l'obtingut pel mètode de referència (aigua afegida) s'han fet unes mesures per a obtenir la humitat higroscòpica dels materials emprats.

La obtenció del contingut d'aigua en percentatge sobre volum es fa seguint els següents càlculs:

$$\frac{\text{pes aigua (g)}}{\text{pes arena seca (g)}} \cdot \text{densitat aigua} \left(\frac{\text{L}}{1000\text{g}} \right) \cdot \text{densitat aparent} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \cdot \frac{1000 \text{ cm}^3}{1\text{L}} \cdot 100 = \% \left[\frac{\text{vol H}_2\text{O}}{\text{vol arena}} \right]$$

3.3.3.1. Humitat higroscòpica

En el moment que s'ha fet la mesura d'humitat MR i s'ha deixat assecar a l'aire, el material ha recuperat la humitat higroscòpica. Per corregir els valors mesurats pel MR, ha calgut buscar la humitat higroscòpica de les mostres sintètiques.

S'han agafat 10 càpsules de porcellana i s'han deixat a l'estufa per a que perdessin la humitat. En treure-les s'han col·locat en el dessecador per a que es refredessin sense guanyar humitat. Un cop fredes, s'han pesat.

En cinc de les càpsules s'hi ha pesat grava i a la resta arena. S'han pesat i s'han posat a l'estufa a 105°C fins a pes constant (24h). En treure-les s'han col·locat al dessecador fins que s'han refredat. Igualment, un cop fredes s'han pesat.

S'ha verificat que la humitat higroscòpica no és significativa per a la mesura de contingut d'aigua MR a les mostres sintètiques. Això ve donat perquè l'arena té una superfície específica molt baixa i, per tant, té poca capacitat de retenció d'aigua.

3.3.4. Densitat aparent

La determinació de la densitat aparent de cada contingut de graves diferent de les mostres sintètiques, es fa duent a terme la determinació del volum dels contenidors. S'omplen d'aigua destil·lada fins a un nivell preestablert i es pesa, traient-hi el pes del contenidor. S'ha pres la densitat de l'aigua a 20°C (1000 kg/m^3), d'aquesta manera el pes en quilograms de l'aigua equival al volum en litres del contenidor.

Tot seguit cal obtenir el pes del sòl amb que es treballa. Cal omplir els contenidors de mostra sintètica fins al mateix nivell que s'ha pres de referència per a l'aigua de manera que es treballa en un volum conegut. Per fer-ho s'ha d'assentar el material deixant-lo caure des de 20 cm d'alçada sobre un taulell de fusta, repetint l'acció fins a quatre cops. Si s'observa que s'ha reduït el volum cal reomplir el contenidor amb mostra sintètica fins arribar al nivell preestablert i tornar a assentar-ho.

Aquest procés cal anar repetint-lo fins que no s'observi cap reducció de volum quan es fa l'assentament. En aquest punt ja es pot dur a la balança per pesar.

Amb totes les dades obtingudes es fa el següent càlcul.

$$D.A. (kg/m^3) = \frac{\text{Pes mostra seca a } 105^{\circ}\text{C (kg)}}{\text{Volum contenidor (m}^3\text{)}}$$

on D.A. correspon al valor de densitat aparent expressada en kg/m^3 .

Tot i que aquest mètode no està estandaritzat dóna bons resultats amb materials desagregats com són els de les mostres sintètiques i amb l'objectiu de comparar les dades de densitat aparent obtingudes amb la mateixa tècnica (Yoro i Godo, 1990).

3.3.5. Tractament estadístic de dades

Els tractaments estadístics de les dades emprats estan descrits a continuació.

- Mitjana (\bar{x})

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

on x correspon al valor de mesura i n correspon al nombre de dades.

- Desviació estàndard (S)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

on x correspon al valor de mesura, \bar{x} correspon a la mitjana dels valors de mesura i n correspon al nombre de dades totals.

- Coeficient de variació (CV). S'ha expressat en tot el treball en percentatge.

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100$$

on S correspon a la desviació estàndard i \bar{x} correspon a la mitjana del conjunt de dades.

- Error mig (ME)⁸

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{MR_i} - \theta_{TDR_i})}{n}$$

on θ_{MR_i} i θ_{TDR_i} corresponen als valors de contingut d'aigua obtinguts pel MR i amb TDR, respectivament, i n correspon al nombre de dades totals.

- Arrel quadràtica de l'error mig (RMSE)⁸

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{MR_i} - \theta_{TDR_i})^2}{n}}$$

on θ_{MR_i} i θ_{TDR_i} corresponen als valors de contingut d'aigua obtinguts pel MR i amb TDR, respectivament, i n correspon al nombre de dades totals.

⁸ Informació extreta de:

Rubio, C. Hidrodinámica de los suelos de un área de montaña media mediterránea sometida a cambios de uso y cubierta"; Tesis Doctoral, UAB, Departament de Biologia animal, biologia vegetal i ecologia, 2005.

- Correlacions entre la humitat pel mètode TDR i la humitat pel mètode de referència.
- Funcions de regressió polinòmica de tercer grau.

Tots els tractaments de dades s'han fet amb l'ajuda del programa Microsoft Excel de Microsoft Office XP Professional amb FrontPage.

4. RESULTATS

4.1. Densitat Aparent

Taula 4.1. Relació entre contingut de graves i densitat aparent.

Contingut en graves (% pes/pes)	n	Densitat aparent (kg/m ³)			Porositat (% vol/vol)
		\bar{x}	S	% CV	\bar{x}
0	5	1870.37	27.39	1.46	29.42
1	5	1888.44	26.98	1.43	28.74
2	5	1916.70	26.60	1.39	27.67
5	5	1955.98	56.70	2.90	26.19
10	5	1954.44	11.29	0.58	26.25
27	5	2057.76	13.00	0.63	22.35
46	5	2048.71	56.82	2.77	22.69
55	5	2042.48	36.87	1.81	22.93

On n correspon al nombre de rèpliques de cada grup. \bar{x} correspon a les mitjanes de cada subgrup. S correspon a les desviacions típiques de cada subgrup. %CV correspon al coeficient de variació de cada subgrup expressat en percentatge.

4.2. Humitat pel Mètode de Referència i TDR

Els espais en buit que hi ha a les taules 4.2 i 4.3 són aquells en els que no es tenen resultats. En tots els casos aquesta situació s'ha donat pel fet que ha augmentat el contingut en graves i, per tant, ha disminuït la quantitat d'aigua a emmagatzemar per les mostres sintètiques.

Aquest fet ha provocat que, a mesura que s'anava avançant en els procediments al laboratori, s'anés baixant el nivell d'humitat màxim a fer, però alhora s'ha intentat mantenir el nombre de mesures per cada contingut de grava diferent.

Taula 4.2. Humitat pel Mètode de Referència expressats en percentatge sobre volum.

Contingut en graves (% pes/pes)	Nivell d'humitat (% vol/vol)								
	<i>5</i>	<i>10</i>	<i>15</i>	<i>17</i>	<i>20</i>	<i>23</i>	<i>25</i>	<i>27</i>	<i>30</i>
<i>0</i>	5.22	10.92	16.46	-	20.73	-	24.82	-	42.21 ⁽¹⁾
<i>S</i>	0.58	0.70	0.68	-	0.64	-	1.04	-	5.02
<i>1</i>	5.52	11.84	17.28	-	21.76	-	29.76	-	44.89
<i>S</i>	0.39	1.75	1.11	-	1.11	-	5.67	-	3.00
<i>2</i>	6.02	11.40	16.86	-	20.84	-	31.03	-	37.72
<i>S</i>	1.08	1.10	1.09	-	1.78	-	4.19	-	11.47
<i>5</i>	4.52 ⁽⁴⁾	8.00 ⁽⁵⁾	12.74	-	16.68	22.64 ⁽⁴⁾	29.78	38.00 ⁽³⁾	39.92 ⁽³⁾
<i>S</i>	0.83	3.73	4.62	-	4.44	1.44	5.38	4.37	5.95
<i>10</i>	6.08	11.92	18.43	-	21.70	27.55 ⁽¹⁾	37.18	-	-
<i>S</i>	1.25	1.57	1.49	-	1.93	3.23	2.73	-	-
<i>27</i>	6.87	14.05	18.29	-	23.91	36.80	36.88	-	-
<i>S</i>	1.23	2.01	1.52	-	1.59	1.69	2.04	-	-
<i>46</i>	6.83 ⁽¹⁾	10.43	16.90	18.48 ⁽⁴⁾	25.86 ⁽⁵⁾	27.52	-	-	-
<i>S</i>	1.16	2.23	1.49	2.19	3.64	1.99	-	-	-
<i>55</i>	5.76	11.20	16.96	20.29	23.77	25.88	-	-	-
<i>S</i>	1.26	1.40	1.25	3.11	2.20	1.49	-	-	-

On n = 15, excepte: ⁽¹⁾ n = 12, ⁽²⁾ n = 11, ⁽³⁾ n = 3, ⁽⁴⁾ n = 9, ⁽⁵⁾ n = 14.

Taula 5.3. Humitat pel Mètode de TDR expressada en percentatge sobre volum.

Contingut en graves (%pes/pes)	Humitat higroscòpica	Nivell d'humitat (% vol/vol)								
		<i>5</i>	<i>10</i>	<i>15</i>	<i>17</i>	<i>20</i>	<i>23</i>	<i>25</i>	<i>27</i>	<i>30</i>
<i>0</i>	-	7.53	11.53	16.48	-	22.52	-	29.21	-	38.50
	<i>S</i>	-	0.80	0.41	0.56	-	1.08	-	0.88	-
<i>1</i>	6.96	8.86	12.43	17.51	-	23.11	-	31.61	-	38.34
	<i>S</i>	0.26	0.31	0.55	0.76	-	1.37	-	2.00	-
<i>2</i>	7.14	8.70	12.29	16.63	-	21.88	-	32.70	-	36.29
	<i>S</i>	0.17	0.32	0.69	0.64	-	0.52	-	2.07	-
<i>5</i>	7.23	8.50	12.20	16.45	-	21.52	25.16 ⁽¹⁾	33.80	38.04 ⁽²⁾	38.88 ⁽²⁾
	<i>S</i>	0.27	0.40	0.77	0.42	-	0.57	1.17	1.29	0.08
<i>10</i>	7.52	8.67	12.13	16.58	-	21.13	29.09 ⁽³⁾	35.67	-	-
	<i>S</i>	0.15	0.46	0.55	0.73	-	1.45	2.77	1.01	-
<i>27</i>	8.32	8.47	10.83	15.75	-	19.87	34.22	36.94	-	-
	<i>S</i>	0.33	0.54	1.59	1.46	-	4.01	1.34	1.13	-
<i>46</i>	8.42	8.72	11.92	15.45	16.94 ⁽¹⁾	35.75	38.61	-	-	-
	<i>S</i>	0.26	0.72	0.95	0.99	4.43	0.74	0.82	-	-
<i>55</i>	8.64	9.10	11.67	18.60	33.06	37.69	39.59	-	-	-
	<i>S</i>	0.30	0.58	1.11	1.79	1.81	0.69	0.54	-	-

On n = 15, excepte: ⁽¹⁾ n = 9, ⁽²⁾ n = 3, ⁽³⁾ n = 12.

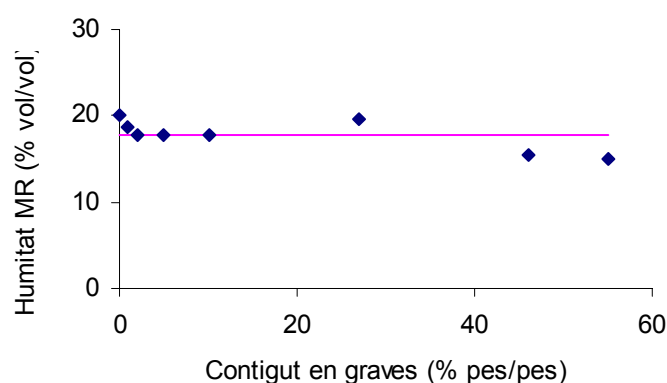
4.3. Control de qualitat de les mostres sintètiques

Per a fer un control de la qualitat de la preparació de mostra utilitzades per a prendre les mesures d'humitat volúmica, tant amb el MR com el TDR, s'ha fet el següent estudi, utilitzant els *Límits de Shewart*⁹.

Primer de tot, s'han agrupat les dades segons el contingut en graves diferent, creant subgrups. S'ha calculat la mitjana de cada subgrup i s'ha representat en les gràfiques següents. Se sap que aquests valors no haurien de divergir massa entre ells, ja que en cada contingut de graves s'hi ha afegit pràcticament el mateix volum d'aigua total.

Per això, es calcula la mitjana del total de subgrups i també es representa a la gràfica. D'aquesta manera els valors de cada subgrup no haurien d'allunyar-se de la mitjana total. Si es dona aquest cas, es pot afirmar que la preparació de les mostres no ha estat prou homogènia.

Taula 4.4. Variació de les mesures de la humitat MR segons cada contingut de graves. El valor de la mitjana de tots valors utilitzats és de 17.80 per a la humitat MR.

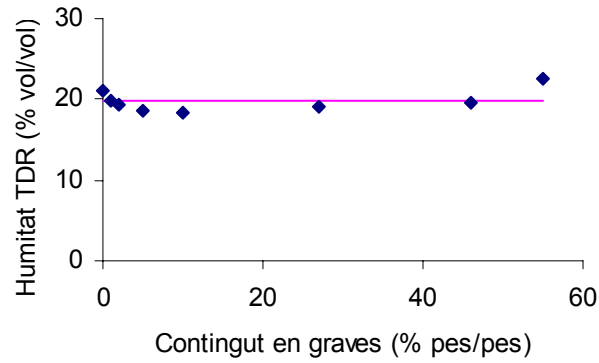


⁹ Informació extreta del llibre:

Gregorich, E.G. i Carter, M.R. (Ed.). Soil quality for crop production and ecosystem health. *Elsevier Science Publications, Amsterdam*, 1997. ISBN 0-444-81661-5.

Taula 4.5. Variació de les mesures de la humitat MR segons cada contingut de graves.

El valor de la mitjana de tots valors utilitzats és de 19.81 per a la humitat TDR.



Les gràfiques obtingudes mostren que les variacions són molt baixes. En el cas de la mesura de contingut d'aigua per MR s'ha donat una major dispersió dels resultats, però no es consideren significatius. Es pot afirmar que la preparació de les mostres ha estat correcta.

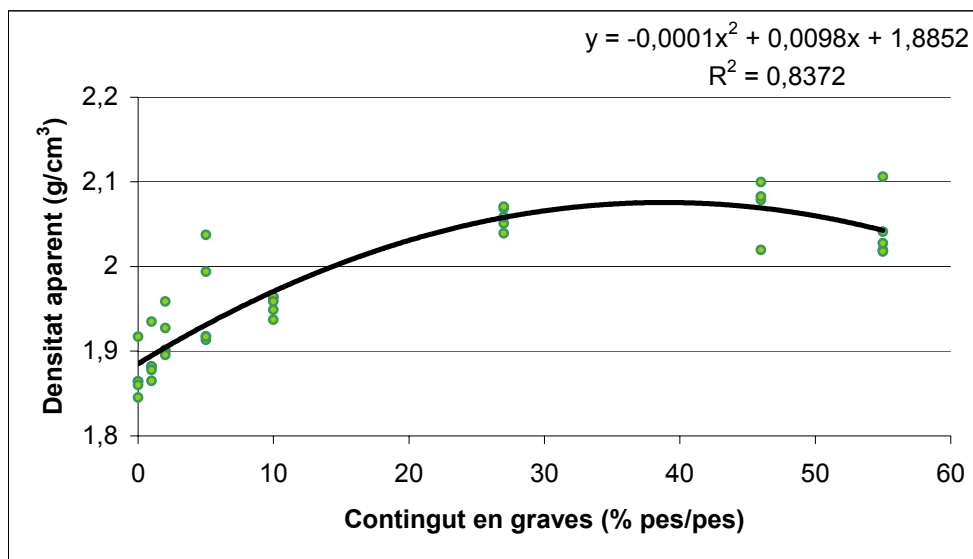
5. DISCUSSIÓ DE RESULTATS

5.1. Relació entre elements grossos i densitat aparent

La densitat aparent és important comparar-la amb el contingut en graves que presenta la mostra sintètica ja que, d'aquesta manera, si es coneix la quantitat de grava que hi ha en un volum conegut de sòl es pot saber la capacitat que té per emmagatzemar aigua en el seu espai porós.

Atès que la composició mineralògica de les arenes i les graves està dominada per la presència de calcita, la porositat del substrat dependrà només de la densitat aparent. Cada cop que s'hi afegeixen graves es produeix un efecte de "dilució" de les característiques de l'arena respecte a les de les graves.

Figura 5.1. Representació gràfica de l'evolució de la densitat aparent de les mostres sintètiques segons el contingut de graves que presenten. Per a cada contingut de graves $n = 5$.



La densitat aparent creix gairebé de forma lineal a mesura que augmenta la presència de graves a les mostres, fins al voltant del 35- 40% de contingut de graves. A partir d'aquí la relació disminueix lleugerament.

En conjunt la relació segueix una funció polinòmica de segon grau.

La dispersió de la mesura és més elevada quan el contingut de graves és menor. S'observa que en el nivell de graves 5% la dispersió és màxima. Això pot ser degut a les característiques de la mescla dels dos materials o bé a un error metodològic, que seria elevat a aquest nivell.

Es pot concloure dient que a mesura que augmenta el contingut de graves en un sòl, fins al voltant del 35-40 %, també n'augmenta la densitat aparent. Per continguts de graves superiors al 40% , la densitat aparent del medi porós disminueix. Això fa que la porositat i la quantitat d'aigua que es capaç de retenir el medi porós augmentin.

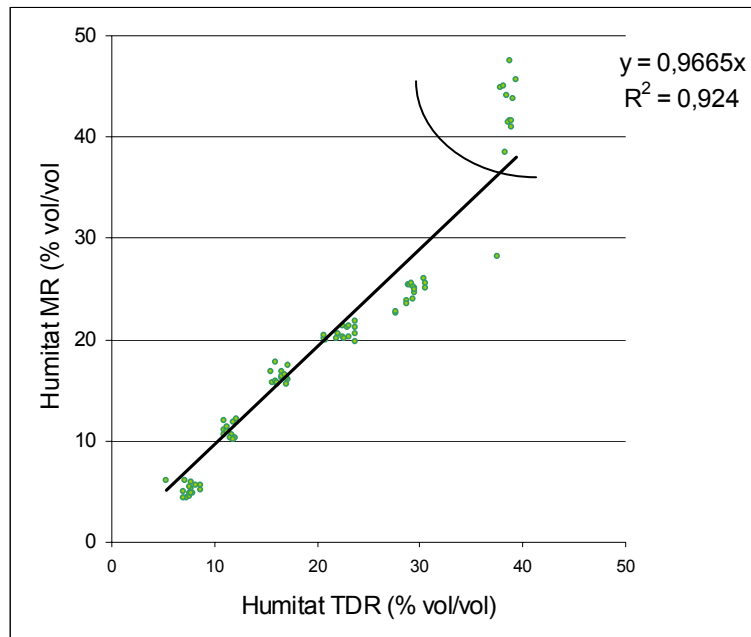
El rang de porositat de les mostres sintètiques oscil·la entre 20% i 29%. Això determina el contingut d'aigua màxim que pot tenir el substrat sense saturació i per tant condiciona el rang de mesura del TDR.

5.2. Relació entre mesures amb TDR i MR

5.2.1. Resposta de l'arena

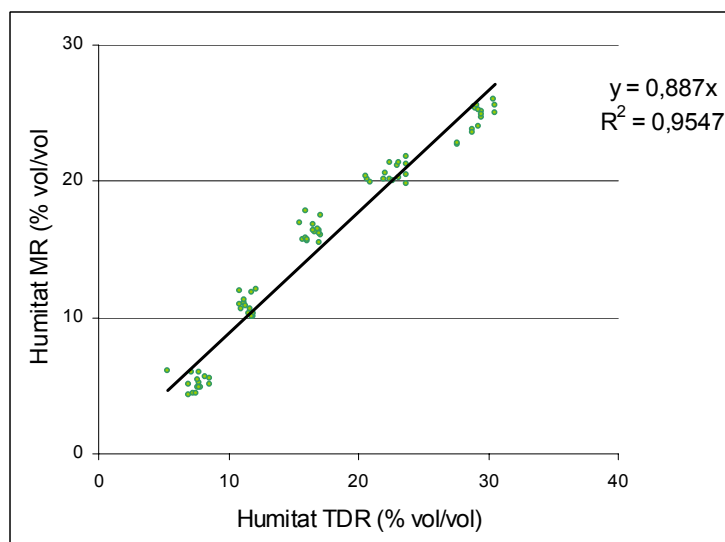
Per observar la resposta del TDR a l'increment de la humitat s'ha representat la resposta del TDR amb MR de l'arena (mostra sintètica amb 0% de graves). La relació que han de presentar aquestes dues variables és $y = x$, ja que el TDR ha de donar els mateixos valors de contingut d'aigua que els que s'obtenen al laboratori pel MR.

Figura 5.1. Representació gràfica de la relació entre totes les mesures de contingut d'aigua amb TDR i MR en mostres amb 0 % de graves.



Les dades que es troben per sobre el límit marcat en el gràfic presenten una sobreestimació quan són mesurades pel MR. Això s'atribueix a un error metodològic a l'hora d'agafar la mostra per portar-la a l'estufa. El fet que el TDR doni valors similars entre ells (al voltant del 38 %) s'atribueix a què en aquests nivells d'humitat es treballa al límit de detecció de les mesures lligat al disseny experimental.

Taula 5.2. Representació gràfica de la relació entre les mesures de contingut d'aigua amb TDR i MR en mostres d'arena, sense les dades que conceptualment no són vàlides.



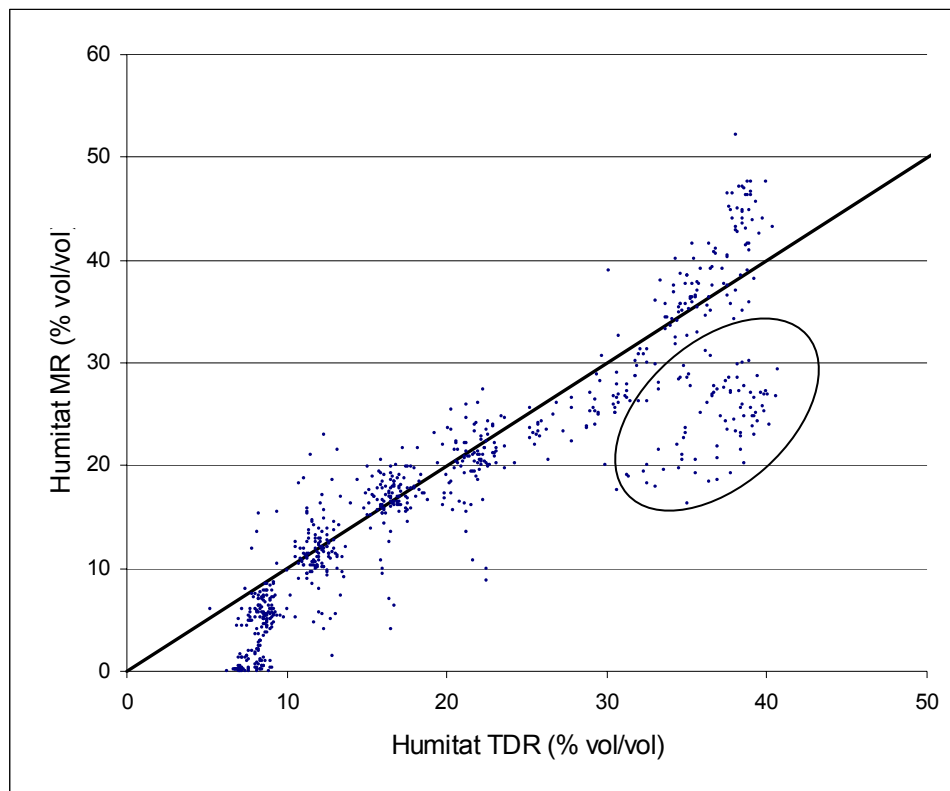
Un cop eliminades les dades considerades com a no vàlides, es veu que hi ha una bona relació entre els valors de contingut d'aigua mesurats amb TDR i MR en un sòl format únicament per arena de diàmetre equivalent inferior a 1 mm. El pendent de la línia de tendència és 0.887 i la R^2 és de 0.9547.

Per tant, es comença l'estudi amb unes mesures correctes obtingudes en les mostres sense cap contingut de graves.

5.2.2. Comportament dels substrats

A la Figura 5.3. hi ha representats tots els valors mesurats de TDR i de MR. La resposta del TDR és bona. Es pot veure que la relació que presenten la totalitat de les mesures és propera. Tot i que a mesura que augmenta el contingut d'aigua els valors obtinguts són més dispersos entre ells, que no pas en els nivells d'humitat més baixos, degut a la saturació parcial de les mostres sintètiques.

Taula 5.3. Representació gràfica de la relació entre les mesures de contingut d'aigua amb TDR i MR en el total de les mostres obtingudes a l'estudi present.



Es poden descriure tres trams clarament diferenciats:

- Tram inicial

La majoria de les dades corresponen al nivell d'humitat d'humitat higroscòpica. El TDR sobreestima el contingut d'aigua a les mostres quan hi ha poca humitat. Aquest fet pot ser degut a l'efecte de qüestions metodològiques en aquest nivell.

Per qüestió de concepte, part d'aquest grup de dades, els corresponents al nivell d'humitat higroscòpica, es consideren erronis.

- Tram central rectilini

Aquest conjunt de dades són les que més s'apropen a la línia de pendent 1. La majoria s'utilitzaran per a fer l'ajust polinòmic final.

- Tram final

Són les dades corresponents als nivells d'humitat superiors. L'explicació que se li ha donat a l'elevada dispersió dels valors és la saturació parcial de la mostra sintètica (Veure la zona de punts encerclada a la Figura 5.3).

A mesura que augmenta la presència de graves en les mostres sintètiques va havent-hi més porositat amb diàmetre equivalent més gran. Això fa que els porus presentin menys capacitat de retenció d'aigua i que la porositat d'aireació (diferència entre porositat total i porositat a capacitat de camp) en les mostres augmenti a mesura que hi ha més graves.

Quan s'hi afegeix aigua a les mostres, primer omplirà els porus més petits i després els grans. Per efecte de la gravetat, l'aigua es va acumulant al fons del contenidor degut a la falta de drenatge, que impedeix que l'aigua que és incapaç de retenir en la porositat pugui sortir.

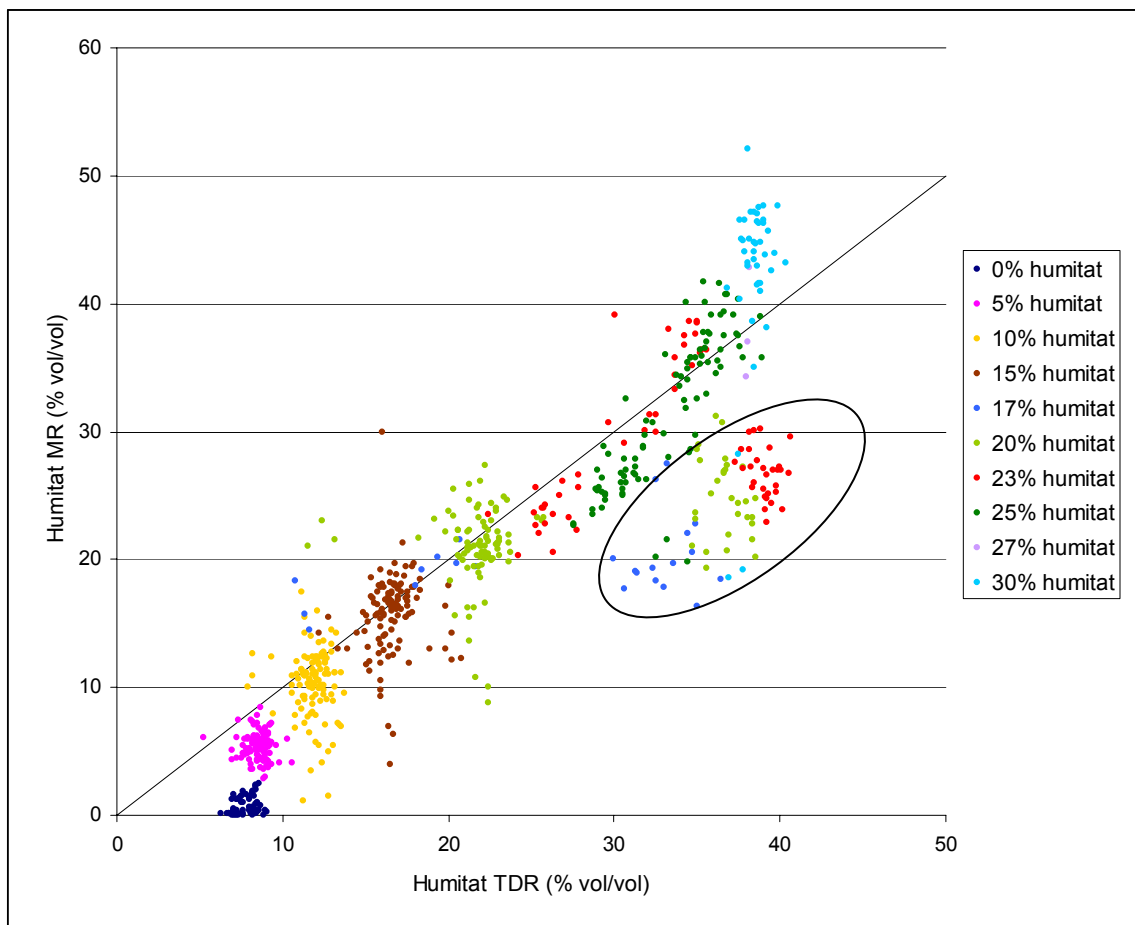
A l'hora de fer la mesura els extrems de les barres del TDR es col·loquen a la zona que està saturada, ja que en aquest cas els contenidors utilitzats a l'estudi són poc profunds. Per tant, l'oscil·loscopi mesura més quantitat d'aigua en el contenidor, però això és degut a què en el punt des d'on emet la segona refracció hi ha una acumulació d'aigua.

Algunes de les dades d'aquest tram no es poden considerar vàlides ja que el valor mesurat pel TDR no representa la quantitat d'aigua real que hi ha a les mostres sintètiques, sinó que és efecte de la segona refracció produïda des d'una zona saturada d'aigua.

5.2.3. Efecte del contingut d'aigua sobre la relació MR i TDR

Per saber la dispersió que presenten les mesures segons el nivell d'humitat, es busca la correlació de les mesures amb el TDR i el MR, segons el nivell d'humitat predeterminat al que pertanyen.

Figura 5.4. Representació gràfica de la relació entre el contingut d'aigua mesurat amb TDR i MR segons el nivell d'humitat predeterminat. La zona encerclada correspon a les dades que s'han considerat errònies.



De forma general es pot dir que quan el contingut d'aigua és menor els valors obtinguts estan molt més agrupats. A mesura que va augmentant el nivell d'humitat, també es van dispersant els resultats. Com ja s'ha explicat, aquest fet s'explica per la saturació parcial de les mostres sintètiques en els nivells d'humitat superiors.

5.3. Anàlisi de la qualitat dels resultats

En aquest apartat es vol comprovar la precisió dels resultats obtinguts. Es fa a partir de la diferència entre les dades preses de MR i TDR, en forma d'Error Mig ($ME = \theta_{MR} - \theta_{TDR}$). Això ens indica si el TDR subestima o sobreestima la les mesures respecte el MR segons els valors siguin positius o negatius respectivament. El valor ME s'ha calculat per cada grup de humitat i contingut de grava.

El valor total de ME és de -2.39 , això indica que de manera generalitzada el TDR sobreestima el contingut d'aigua que hi ha a la mostra. S'ha vist que això és especialment problemàtic en els nivells d'humitat més baixos i en els més alts quan el contingut de graves és superior

En les taules 5.1 i 5.2 estan marcats en color els valors que presenten les pitjors relacions entre les mesures preses amb TDR i MR. I també s'ha fet el mateix amb els grups on les mesures ja no es van poder dur a terme per l'excés d'aigua als contenidors.

Taula 5.1. Valors obtinguts d'error mig (ME) segons el contingut en graves i humitat.

Contingut de graves	Nivells d'humitat									
	%vol/vol									
%pes/pes	0	5	10	15	17	20	23	25	27	30
0%		-2.34	-0.09	-0.69		-0.74		-4.04		3.38
1%	-6.83	-3.34	-0.59	-0.23		-1.35		-1.85		6.55
2%	-6.63	-2.68	-0.89	0.23		-1.04	-9.85	-1.67		4.26
5%	-6.79	-3.95	-4.17	-3.71		-4.84	-2.52	-4.02	-0.04	1.04
10%	-6.57	-2.59	-0.21	1.85		0.57	-1.55	1.51		
27%	-7.06	-1.60	3.22	2.54		4.04	2.58	-0.06		
46%	-7.71	-2.04	-1.49	1.49	-5.10	-4.65	-12.33			
55%	-6.67	-3.35	-0.47	-1.64	-12.77	-13.92	-13.70			

La majoria dels valors de ME són negatius. Tot i això hi ha de positius, la majoria dels quals es troben en nivells d'humitat i amb continguts de graves alts. A més també s'observa que els valors més allunyats de 0 es troben en els continguts de graves més alts i en totes les dades del grup del 0% d'humitat.

La dispersió entre els valors s'ha mesurat amb l'arrel quadràtica de l'error mig (RMSE). Com més propers a 0 són els valors de RMSE, menys dispersió hi ha dels resultats. La RMSE de totes les dades dona 5.60, això indica que la relació entre els valors no és prou ajustada. Els grups més problemàtics són aquells que ja s'ha comentat que convindria eliminar.

Taula 5.2. Valors obtinguts de l'arrel quadràtica de l'error mig (RMSE) segons el seu contingut en graves i humitat.

Contingut de graves	Nivells d'humitat									
	%vol/vol									
%pes/pes	0	5	10	15	17	20	23	25	27	30
0%		2.55	0.80	1.09		1.29		4.20		5.64
1%	6.84	3.37	1.87	1.23		1.77		4.29		7.15
2%	6.66	2.94	1.45	0.95		2.10	245.61	2.92		6.06
5%	6.79	4.02	5.80	5.73		6.65	3.10	6.55	3.50	4.83
10%	6.61	2.87	1.52	2.25		2.14	2.20	2.48		
27%	7.15	1.96	4.03	3.09		5.09	3.42	1.85		
46%	7.75	2.49	2.75	2.31	6.21	7.86	12.54			
55%	6.75	6.22	1.58	2.39	13.22	14.13	13.78			

Les dades de RMSE mostren que els valors de les mesures amb MR i TDR es distancien més entre ells a mesura que augmenta el contingut en graves, en els valors més elevats de humitat. Això és degut al fet que baixa la porositat, i per tant, la quantitat d'aigua que és capaç d'emmagatzemar.

El grup de valors obtinguts de les dades de 2% de graves i 23% de nivell d'humitat dona una RMSE massa elevada. No es coneix cap motiu per a que aparegui un valor tan alt, pot ser degut a un error de mesura al laboratori.

S'han pres els valors de ME i RMSE com a indicadors de qualitat dels resultats. Les dades que s'eliminaran es troben dins dels grups que presenten un ME més allunyat de 0 que 12.33, tant positiu com negatiu, i els que presenten valors de RMSE superiors a 12.54.

Pel càlcul de l'ajust polinòmic s'han descartat les dades que es troben incloses en els següents grups:

- Nivell d'humitat 0%, per desajust conceptual (requadres verds en Taula 5.1 i 5.2).
- Nivell d'humitat 23% i contingut de graves 2%, per errors metodològics (requadre gris en les Taula 5.1 i 5.2).
- Nivell d'humitat 23% i contingut de graves 46%, i nivells d'humitat 17, 20 i 23% del contingut de graves 55%, per saturació parcial del medi (requadres taronges en les Taules 5.1 i 5.2).

En total s'han descartat 139 dades mesures (22%) d'un total 765. El rang de dades en el que es treballarà a l'estudi seran superior al 5% de nivell d'humitat i, en els continguts de graves 46 i 55% hauran de ser inferiors al 20 i 15 % de nivell d'humitat, respectivament.

Això no significa que el TDR només serveixi per a aquest rang d'humitats, sinó que en les condicions en que s'ha desenvolupat l'estudi present s'han hagut de descartar certes dades degut, en la majoria dels casos, a la saturació parcial del medi. Treballar amb unes mostres sintètiques d'arena ha accentuat més aquesta saturació, ja que el diàmetre equivalent de la porositat de l'arena és gran, això fa que no sigui capaç de retenir tanta aigua i provocarà acumulació a la base del contenidor.

La porositat d'aireació de les mostres sintètiques augmenta quan s'hi afegeixen elements grossos, provocant una menor capacitat de retenció d'aigua que marxa per drenatge o, com en les condicions de l'estudi present, s'escola fins al fons del contenidor i allí s'hi va acumulant.

5.4. Resposta del TDR segons el contingut de graves

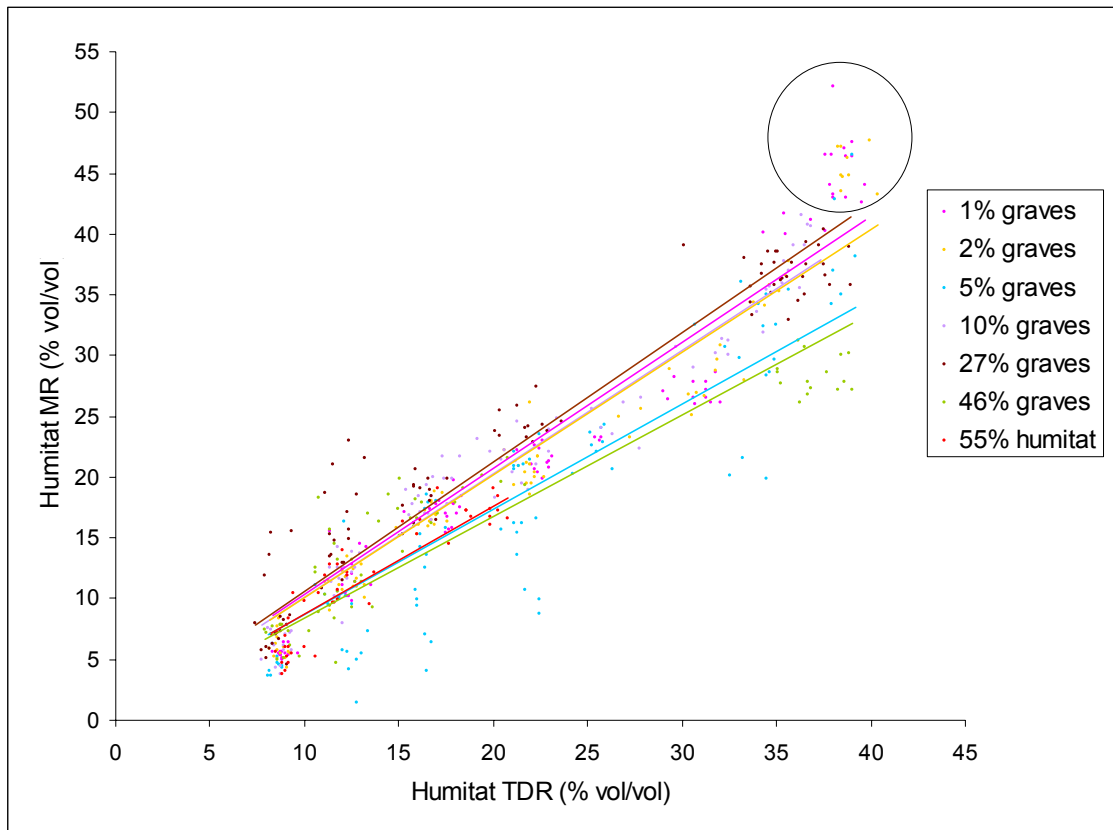
Un cop s'han eliminat les dades que presentaven majors diferències entre les mesures de TDR i MR, es representa la relació entre les dades de TDR i MR segons el contingut de graves de cadascuna, amb les seves corresponents línies de tendència.

Amb les dades exposades a continuació es pot dir que la relació entre les mesures de contingut d'aigua preses amb TDR i MR és prou ajustada. Si es tenen en compte les funcions obtingudes de cada contingut de graves diferent es veu la proximitat que presenten a la funció $y = x$. A més, la R^2 en la majoria dels casos és bastant elevada, indicant que la relació entre les dades utilitzades amb la funció que se n'extreu és molt propera.

Només en el cas del 55% de graves el valor de R^2 és més baix i la funció de la línia de tendència queda allunyada de la que hauria de seguir. Això pot ser degut al fet que d'aquest grup se n'han eliminat la majoria de les dades per mala correlació entre els valors de TDR i MR, i no hi ha representats els valors de nivells d'humitat més elevats, per tant la línia de tendència s'ajusta només a una part de les dades.

Es veu que el grup de dades encerclades en la Figura 5.5 presenten una subestimació del contingut d'aigua per part del TDR. Tots els punts pertanyen al nivell d'humitat 30% (veure Figura 5.4) i a 1, 2 i 5% de contingut de graves. Es pot tractar d'un error metodològic o a una tendència en què a més presència d'elements grossos major és la sobreestimació de les mesures del TDR.

Figura 5.5. Representació gràfica de la relació entre el contingut d'aigua mesurat amb TDR i MR segons el contingut de graves.



Taula 5.3. Dades de la funció i la R^2 que segueixen les línies de tendència de cada grup de contingut de graves diferent.

Contingut en graves (% pes/pes)	Pendent	R^2
1	1,035	0,9173
2	1,0106	0,9345
5	0,8672	0,8134
10	1,0121	0,9526
27	1,0621	0,9244
46	0,836	0,8171
55	0,8772	0,8103

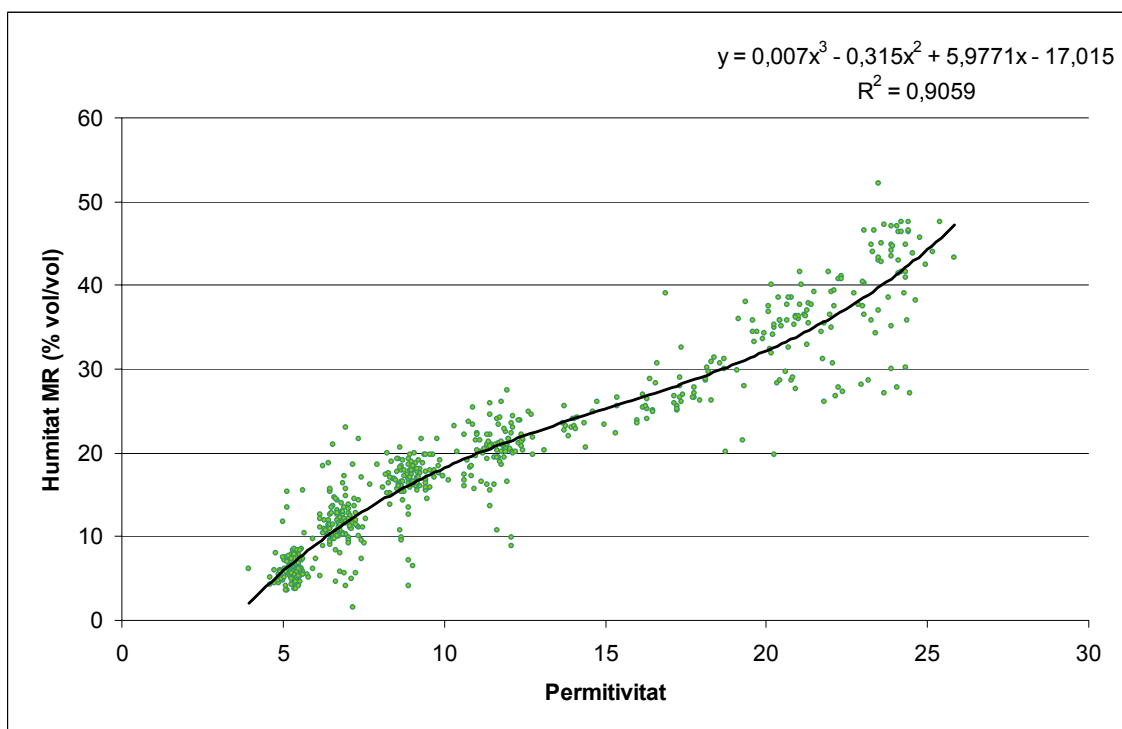
5.5. Relació entre el contingut d'aigua MR i la permitivitat elèctrica

Tal com va fer Topp et al. (1980) per trobar la funció que s'ha utilitzat anteriorment en aquests treball, es busca la correlació que presenten les dades de contingut d'aigua preses pel MR i la permitivitat elèctrica de la mostra sintètica mesurada pel TDR.

D'aquesta manera es comprova si les dades obtingudes en l'estudi que es presenta realment segueixen la funció de Topp et al. (1980) o si se n'ha d'aplicar una correlació experimental pròpia, provocada per la presència de graves en el sòl. La funció a la que tendeix s'ha anomenat "Correlació Experimental".

La tendència esperada ha de seguir una funció polinòmica de tercer grau, tal com fa l'equació de Topp et al. (1980).

Figura 5.6. Representació gràfica de la correlació entre les dades de contingut d'aigua amb MR i la permitivitat elèctrica del medi porós.



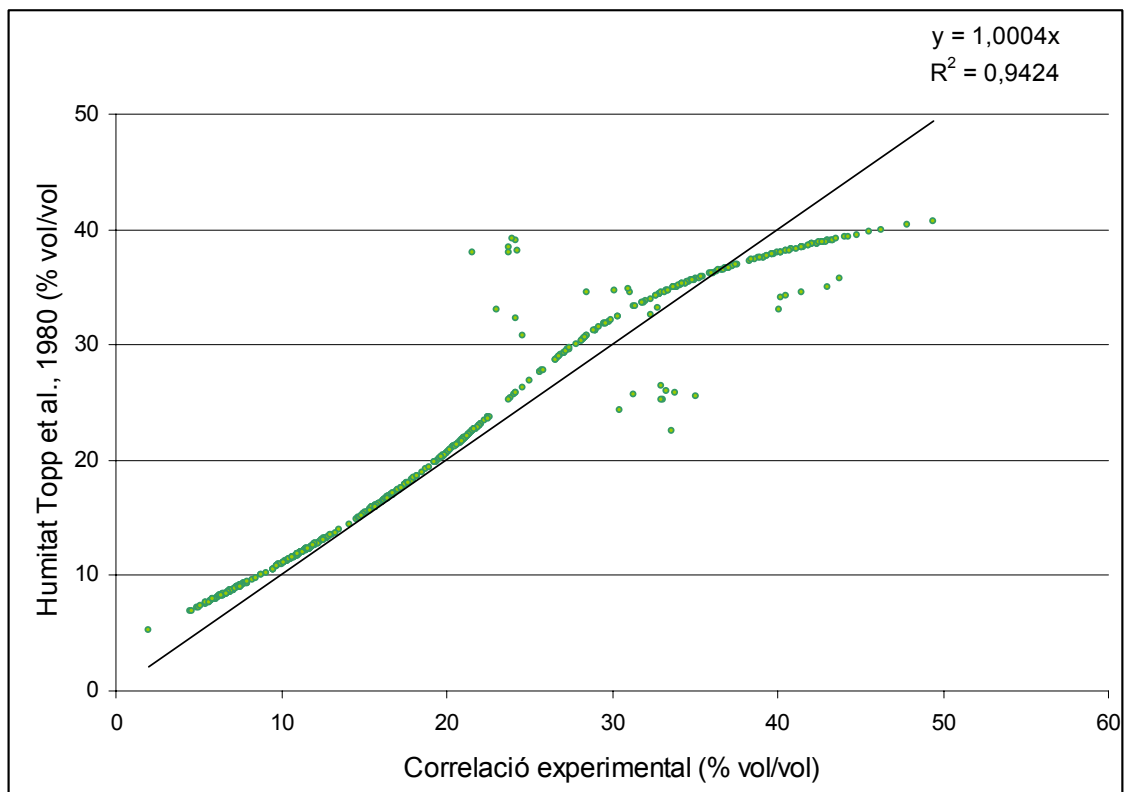
Taula 5.4. Comparació entre la Correlació Experimental obtinguda i l'equació de Topp et al. (1980).

θ	ε^3	ε^2	ε	Terme independent
Correlació Experimental (2006):	0.007	- 0.315	5.9771	- 17.015
Topp et al. (1980):	0.0000043	- 0.00055	2.92	- 0.053

on θ correspon al contingut d'aigua (% vol/vol) i ε correspon a la permitivitat elèctrica.

5.5.1. Relació entre humitat TDR calculada amb Topp et al. (1980) i amb la Correlació Experimental

Figura 5.7. Representació gràfica de la relació entre la humitat TDR calculada amb Topp et al. (1980) i amb la Correlació Experimental.



En valors d'humitat més baixos l'equació de Topp et al. (1980) dona mesures més altes de contingut d'aigua, això succeeix fins al voltant del 35 % d'humitat en que aquesta tendència varia. A partir d'aquí és la Correlació Experimental la que dona continguts d'aigua superiors.

Al voltant del 20% d'humitat, els punts del gràfic presenten major dispersió. Es veu l'efecte de la saturació parcial de les mostres sintètiques, corresponents als grups de dades que no presentaven una RMSE gaire alta. Aquests punts no són significatius ja que són pocs si es compara amb el nombre total de dades que s'han representat i, a més, és acceptable que hi hagi dispersions.

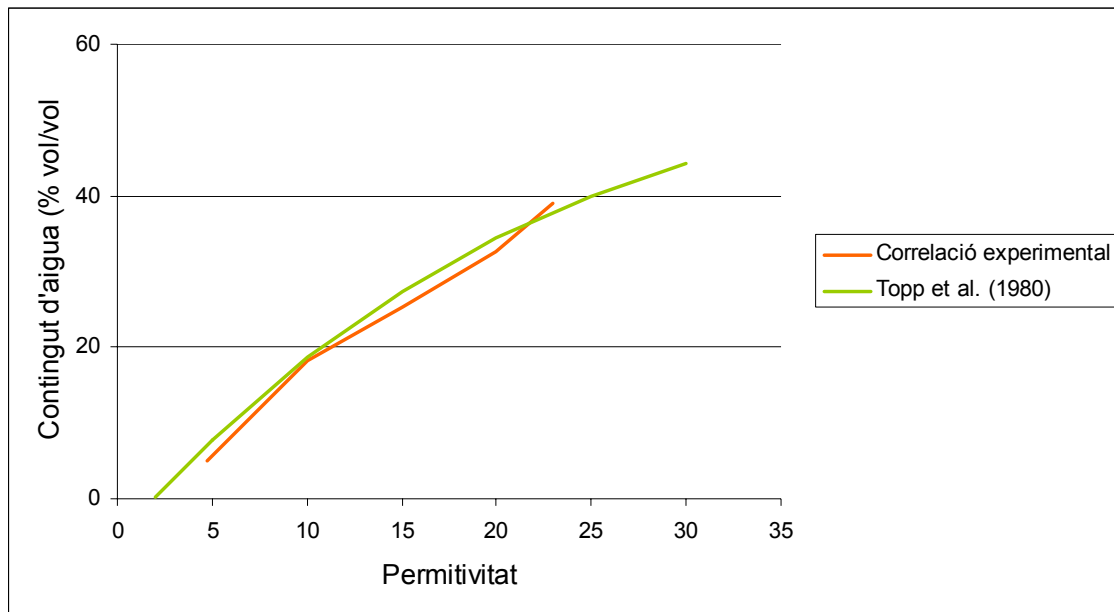
Es pot concloure dient que la relació entre els valors d'humitat mesurats amb TDR aplicant-hi la funció de calibració de Topp et al. (1980) i la Correlació Experimental és molt ajustada al pendent igual a la unitat.

Això ens indica que, en sòls amb graves de fins a 13 mm de diàmetre i en quantitat inferior al 55%, la funció de Topp et al. (1980) ha donat bons resultats en les condicions de l'estudi present. Tal com ja havia dit Grungil et al. (1989) en un estudi que van realitzar amb graves de 0.5 a 12.5 mm i en continguts superiors al 50%.

5.5.2. Relació entre funció de Correlació Experimental i Topp et al. (1980)

Per acabar, es presenta la Figura 5.8, on es comparen gràficament les dues equacions esmentades, per veure les tendències que segueixen cadascuna de les funcions i comprovar si realment presenten diferències significatives entre sí.

Figura 5.8. Representació de la corba de Correlació Experimental i de Topp et al. (1980) respecte la permitivitat obtinguda pel TDR.



La representació de la correlació experimental s'ha acotat als valors d'humitat des dels quals s'ha obtingut la funció, sinó s'estarien representant dades no vàlides. Això correspon al rang de valors de permitivitat d'entre 4.75 fins al voltant de 23 per aquest experiment.

Amb valors de permitivitat elèctrica més baixos, la Correlació Experimental (medi amb graves) subestima el contingut d'aigua, respecte a la funció per a medis porosos de Topp et al. (1980), tot i que les línies de les funcions són molt pròximes entre sí.

Les dues funcions segueixen tendències molt pròximes fins al voltant de 21 de permitivitat, on la Correlació Experimental dona respecte a la funció de Topp et al. (1980) més contingut d'aigua per a una mateixa permitivitat.

Es pot concloure reafirmant el que ja s'ha dit l'apartat 5.5.1, que la relació entre les dues funcions de calibració, la Correlació Experimental i la de Topp et al. (1980), és molt bona. És correcta utilitzar l'equació de Topp et al. (1980) per a calcular el contingut d'aigua mesurat amb TDR en sòls amb contingut de graves fins al 55%, de diàmetres d'entre 8 a 13 mm.

6. CONCLUSIONS

S'han mesurat set nivells d'humitat de cadascun dels vuit mostres sintètiques amb continguts de graves diferents en condicions de laboratori amb el dispositiu TDR. Els valors obtinguts s'han relacionat amb el contingut d'aigua mesurat pel Mètode de Referència (estufa a 105 °C fins a pes constant).

Les mostres sintètiques estan formades per arena i s'hi han barrejat diferents percentatges de graves (0, 1, 2, 5, 10, 27, 46 i 55). De cada grup se n'ha calculat la densitat aparent i la porositat.

La densitat aparent de les mostres sintètiques va des de 1860 a 2110 kg/m³, corresponents als continguts de graves de 0 i 55%, respectivament. La relació que presenta la densitat aparent (y) respecte quantitat de graves (x expressat en % pes/pes) del medi porós estudiat segueix la funció $y = -0.0001 x^2 + 0.0098 x + 1.8852$ amb una R² de 0.83.

El rang de porositat de les mostres sintètiques oscil·la entre 20% (màxim contingut de graves) i 29% de l'arena (0% graves).

Segons el nivell d'humitat de les dades la resposta del TDR varia. Així, en continguts d'aigua baixos el dispositiu dona valors amb poca desviació, tot i que es sobreestima una mica el contingut real d'aigua que hi ha. I a mesura que augmenta la humitat les mesures la desviació és més important.

Segons els continguts de graves de les mesures les dades d'humitat obtingudes presenten, més o menys, la mateixa distribució, excepte en el 46 i 55% de graves, on s'ha detectat problemes de saturació parcial del medi.

L'aigua que la porositat de diàmetre equivalent més gran no pot retenir drena. Però en les condicions en que s'ha desenvolupat l'estudi, aquesta aigua queda acumulada al fons dels contenidors.

La saturació ha provocat errors en les mesures amb el TDR i ha fet que a mesura que s'avançava al laboratori s'haguessin d'anar modificant els nivells d'humitat

superiors. Així, a mesura que s'hi afegia graves s'ha passat del 30 % d'humitat màxima en l'arena, al 23 % d'humitat màxima en les mostres amb 46 i 55 % de graves.

S'han descartat un 22 % de dades errònies, que no s'han pogut tenir en compte per fer l'ajust polinòmic: i) per desajust de concepte totes les dades de la humitat higroscòpica, ii) per errors metodològics totes les pertanyents al 2 % de graves i 23% d'humitat, i iii) per saturació parcial de les mostres totes les mesures del nivell d'humitat 23% i contingut de graves 46%, i les dels nivells d'humitat 17, 20 i 23% del contingut de graves 55%.

Aquest subtrat presenta fortes limitacions per validar l'aplicació del TDR ja que el seu sistema porós reté poca aigua a potencials matrius mitjos i alts.

Per a fer l'ajust polinòmic s'ha treballat amb un rang de dades que van des del nivell d'humitat 5 % fins a un nivell d'humitat superior que ha variat en funció de la presència d'elements grossos. El nivell d'humitat més alt ha anat del 30% pel 0, 1, 2 i 5 % de contingut de graves, fins al 15 % pel contingut de 55 % de graves.

Amb les dades depurades de permetivitat elèctrica que ha donat el TDR i les mesures de contingut d'aigua obtingudes pel MR es troba la funció de calibració pròpia (Correlació Experimental), diferent a la de Topp et al. (1980), específica per a aquest medi en condicions de laboratori on hi ha presència d'elements grossos.

Correlació Experimental (2006):

$$\theta = 0.007\varepsilon^3 - 0.315 \varepsilon^2 + 5.9771 \varepsilon - 17.015$$

on θ és el contingut d'aigua al sòl expressat en percentatge sobre volum i ε correspon a la permetivitat elèctrica.

La Correlació Experimental segueix una tendència molt pròxima a la funció de Topp et al. (1980). Això indica que en sòls amb una quantitat de graves (diàmetre entre 8 i 13 mm) inferior al 55%, la funció de Topp et al. (1980) ha resultat ser bona per a les mesures de contingut d'aigua amb el TDR.

7. BIBLIOGRAFIA

- Ceballos, A.; Martínez Fernández, J.; Wagner, W. i Scipal, K. Validación de la técnica *ers-scatterometer* para estimar la humedad del suelo a partir de mediciones de TDR en el sector semiárido de la cuenca del duero (España). *VI Jornadas de Investigación en la Zona No Saturada del Suelo*, 2003, Valladolid.
- Dalmau, C. Aplicació del mètode TDR per l'obtenció de la humitat de medis porosos d'interés agrícola i mediambiental en contenidor. Treball Final de Carrera, ESAB- UPC, 2005.
- Dirksen, C. *Soil physics measurements*. Reiskirchen: Catena Verlag, 1999. ISBN 3-923381-43-3.
- Drungil, C.E.C.; Abt, K. i Gish, T.J. Soil-moisture determination in gravelly soils with time-domain reflectometry. *American Society of Agricultural Engineers*, 1989, vol. 32, p.177-180.
- España Dirección General de Política Alimentaria. *Métodos oficiales de análisis*. Madrid Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1993- 1994. ISBN 84-491-0000-3 (o.c.).
- Gras, R. *Sols caillouteux et production végétale*. Paris: INRA Editons, 1994. ISBN 2-7380-0521-7.
- Greco, R. Soil water content inverse profiling from single TDR waveforms. *Journal of Hydrology*. Amsterdam, 2006, vol. 317, núm. 3/ 4, p. 325-339.
- Gregorich, E.G. i Carter, M.R. (Ed.). Soil quality for crop production and ecosystem health. *Elsevier Science Publications*. Amsterdam, 1997. ISBN 0-444-81661-5.
- Josa, R.; Jorba, M.; Hereter, A. I Vallejo, R. Humedad en los substratos de restauración y respuesta de la vegetación. *II Congreso Ibérico de la Ciencia del Suelo*, 2006, Huelva.

- Kim, D. J.; Choi, S. I.; Ryszard, O.; Feyen, J. i Kim, H. S. Determination of moisture content in a deformable soil using time-domain reflectometry (TDR). *European Journal of Soil Science*, 2000, vol.51, núm. 1, p.119-127.
- Yoro, G. i Godo, G. Les méthodes de mesure de la densité apparente. Analyse de la dispersion de résultats dans un horizon donné. *Cahiers ORSTOM, Serie Pedologie*, 1989-1990, vol. 25, núm. 4, p. 423-429.
- Llopis Herrero, J. Intervencions restauradores de sòls en talussos de pedreres de roca calcària a Catalunya estudi comparatiu de característiques físiques del sòl. Treball Final del Carrera, ESAB- UPC, 2001.
- Llorens, P.; Latron, J. i Gallart, F. Dinámica espacio-temporal de la humedad del suelo en un área de montaña mediterránea. Cuencas experimentales de Vallcebre (Alto Llobregat). *VI Jornadas de Investigación en la Zona No Saturada del Suelo*, 2003, Valladolid.
- Martínez Fernández, J. i Ceballos Barbancho, A. Diseño y validación de una sonda TDR para la medición de la humedad del suelo. *V Jornadas de Investigación en la Zona No Saturada del Suelo*, 2001, Universidad de Navarra.
- Regalado, C.M.; Muñoz Carpena, R.; Socorro, A.R. i Hernández Moreno, J.M. ¿Por qué los suelos volcánicos no siguen la ecuación de Topp? *V Jornadas de Investigación en la Zona No Saturada del Suelo*, 2001, Universidad de Navarra.
- Robinson, D.A.; Jones, S.B.; Wraith, J.M.; Or, D. i Friedman, S.P. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, 2003, vol. 2, núm. 4, p. 444-475.
- Rothe, A; Weis, W; Kreutzer, K; Matthies, D; Hess, U. i Ansorge, B. Changes in soil structure caused by the installation of time domain reflectometry probes and their influence on the measurement of soil moisture. *Water Resources Research*, 1997, vol. 33, núm. 7, p.1585-1593.

- Rubio, C. Hidrodinámica de los suelos de un área de montaña media mediterránea sometida a cambios de uso y cubierta”; Tesis Doctoral, UAB, Departament de Biología animal, biología vegetal i ecologia, 2005.
- Sauer, T.J. i Logsdon, S.D. Hydraulic and physical properties of stony soils in a small watershed. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, vol. 66, núm. 6, p.1947-1956.
- Solsona, C. M.; Ibáñez Neto, M. i Rosell, J. I. Diseño, construcción y calibración de una sonda eléctrica de medida de contenido de agua en el suelo. *V Jornadas de Investigación en la Zona No Saturada del Suelo*, 2001, Universidad de Navarra.
- Spittlehouse, D. L. Using time domain reflectometry in stony forest soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 2000, vol. 80, p. 3–11.
- Sun, Z. J.; Young, G. D.; McFarlane, R. A. i Chambers, B.M. The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time-domain reflectometry in sandy soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 2002, vol. 82, núm. 3, p.389-394.
- Whalley, W. R. Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. *Journal of Soil Science*, 1993, vol. 44, p. 1-9.

Pàgines web consultades

AstroMía. Tierra, Sistema Solar y Universo

“Glosario: Isótropo” (2005) [en línia]

www.astromia.com/glosario/isotropo.htm [01/12/06 8:14]

Bibliotècnica. La biblioteca digital de la UPC

“Com presentar una bibliografia. Com citar un text” [en línia]

http://biblioteca.upc.es/fullsaccs/fulls/Serie6_4_Catala.pdf [17/11/06 12:15]

Bibliotècnica. La biblioteca digital de la UPC

“Com presentar un treball acadèmic” [en línia]

http://biblioteca.upc.es/fullsaccs/fulls/Serie6_5_Catala.pdf [17/11/06 12:15]

Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya

“Estat actual del procés de restauració de les activitats extractives” [en línia]

http://mediambient.gencat.net/cat/el_medi/natura/extractives/restauracio.jsp
[10/11/06 11:05]

Gremi d'àrids de Catalunya

“Què són els àrids?” (2004) [en línia]

www.gremiarids.com/catala/queson/default.php [16/03/06]

Laboratorio de investigación Suelo- Agua- Planta. Universidad de Chile

“Medición del contenido de humedad en el suelo” (2005) [en línia]

www.sap.uchile.cl/docencia/SAP/MEDICION1.PDF [10/11/06 9:30]

Soilmoisture equipment corporation

“What is Time Domain Reflectometry?” (1998) [en línia]

<http://www.soilmoisture.com/trace.html> [17/11/06 12:35]

Sowacs.com: The Central Resource for Soil Moisture Measurement

“TDR Time Domain Reflectometers” (2001) [en línia]

www.sowacs.com/sensors/tdr.html [18/10/06 8:48]

Wikipedia. La enciclopedia libre

“Impedancia” [en línia]

<http://es.wikipedia.org/wiki/Impedancia> [16/03/06]

Wikipedia. La enciclopedia libre

“Permitividad” [en línia]

<http://es.wikipedia.org/wiki/Permitividad> [16/03/06 i 17/11/06 12:20]

8. ANNEXES

ANNEX I

Annex de dades. Mesures TDR i MR

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
0	5	2,282	2,647	3,9	5,27	6,06
0	5	2,283	2,693	5,0	7,78	5,22
0	5	2,283	2,683	4,7	7,21	6,01
0	5	2,281	2,682	4,7	7,26	4,42
0	5	2,282	2,688	4,9	7,55	4,45
0	5	2,282	2,694	5,0	7,90	4,86
0	5	2,282	2,677	4,6	6,92	4,34
0	5	2,281	2,677	4,6	6,98	5,06
0	5	2,281	2,688	4,9	7,61	4,84
0	5	2,282	2,691	4,9	7,72	5,98
0	5	2,281	2,705	5,3	8,60	5,55
0	5	2,281	2,698	5,1	8,19	5,64
0	5	2,28	2,687	4,9	7,61	5,39
0	5	2,281	2,691	5,0	7,78	4,88
0	5	2,28	2,704	5,3	8,60	5,12
0	10	2,28	2,742	6,3	10,89	10,98
0	10	2,28	2,748	6,5	11,26	11,05
0	10	2,28	2,747	6,4	11,19	11,32
0	10	2,281	2,743	6,3	10,89	11,97
0	10	2,279	2,756	6,7	11,82	11,89
0	10	2,281	2,763	6,9	12,13	12,11
0	10	2,28	2,758	6,7	11,88	10,08
0	10	2,282	2,758	6,7	11,75	10,23
0	10	2,28	2,759	6,8	11,94	10,29
0	10	2,281	2,75	6,5	11,32	10,89
0	10	2,28	2,754	6,6	11,63	10,58
0	10	2,282	2,761	6,8	11,94	10,32
0	10	2,279	2,751	6,6	11,50	10,28
0	10	2,279	2,756	6,7	11,82	10,09
0	10	2,28	2,744	6,4	11,01	10,59
0	15	2,278	2,812	8,4	15,46	16,89
0	15	2,28	2,83	8,9	16,50	16,87
0	15	2,28	2,824	8,7	16,11	15,63
0	15	2,28	2,818	8,5	15,72	15,70
0	15	2,279	2,831	9,0	16,63	16,27
0	15	2,281	2,838	9,2	16,96	16,34
0	15	2,28	2,84	9,3	17,16	16,09
0	15	2,28	2,838	9,2	17,03	16,15
0	15	2,278	2,828	8,9	16,50	16,40
0	15	2,28	2,822	8,7	15,98	17,82
0	15	2,282	2,842	9,3	17,16	17,48
0	15	2,28	2,836	9,1	16,90	16,50
0	15	2,28	2,822	8,7	15,98	15,85
0	15	2,28	2,838	9,2	17,03	15,54
0	15	2,28	2,824	8,7	16,11	15,74
0	20	2,28	2,896	11,2	20,87	19,92
0	20	2,28	2,894	11,1	20,74	20,17

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
0	20	2,28	2,912	11,8	21,94	20,16
0	20	2,28	2,892	11,0	20,61	20,33
0	20	2,28	2,92	12,1	22,47	20,19
0	20	2,28	2,914	11,9	22,07	20,57
0	20	2,28	2,922	12,2	22,60	20,07
0	20	2,282	2,94	12,8	23,66	19,76
0	20	2,28	2,93	12,5	23,13	20,29
0	20	2,282	2,94	12,8	23,66	21,85
0	20	2,28	2,938	12,8	23,66	21,26
0	20	2,282	2,93	12,4	23,00	21,12
0	20	2,282	2,932	12,5	23,13	21,41
0	20	2,279	2,938	12,8	23,73	20,50
0	20	2,281	2,921	12,1	22,47	21,37
0	25	2,281	3,017	16,0	28,75	23,84
0	25	2,279	2,997	15,2	27,59	22,66
0	25	2,281	2,999	15,2	27,59	22,79
0	25	2,281	3,043	17,1	30,40	25,97
0	25	2,281	3,019	16,1	28,88	25,45
0	25	2,279	3,027	16,5	29,51	24,68
0	25	2,279	3,043	17,2	30,52	25,03
0	25	2,281	3,021	16,2	29,01	25,34
0	25	2,28	3,024	16,3	29,26	24,03
0	25	2,28	3,028	16,5	29,51	25,12
0	25	2,28	3,044	17,2	30,52	25,52
0	25	2,282	3,026	16,3	29,26	25,29
0	25	2,278	3,014	16,0	28,75	23,57
0	25	2,28	3,028	16,5	29,51	24,93
0	25	2,282	3,024	16,2	29,13	25,60
0	30	2,278	3,166	23,3	37,81	44,88
0	30	2,278	3,16	22,9	37,48	28,16
0	30	2,28	3,174	23,6	38,13	44,98
0	30	2,28	3,186	24,2	38,78	41,59
0	30	2,28	3,192	24,5	39,09	43,82
0	30	2,278	3,176	23,8	38,35	38,54
0	30	2,278	3,186	24,3	38,88	40,93
0	30	2,278	3,182	24,1	38,67	41,38
0	30	2,28	3,18	23,9	38,46	44,10
0	30	2,28	3,196	24,8	39,30	45,61
0	30	2,28	3,188	24,3	38,88	41,62
0	30	2,28	3,186	24,2	38,78	47,56
1	0	2,282	2,675	4,6	6,81	0,14
1	0	2,28	2,68	4,7	7,21	0,16
1	0	2,28	2,674	4,6	6,87	0,14
1	0	2,281	2,678	4,6	7,04	0,18
1	0	2,28	2,673	4,6	6,81	0,16
1	0	2,281	2,682	4,7	7,26	0,23
1	0	2,282	2,682	4,7	7,21	0,13

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
1	0	2,281	2,677	4,6	6,98	0,15
1	0	2,281	2,674	4,6	6,81	0,12
1	0	2,28	2,68	4,7	7,21	0,16
1	0	2,28	2,676	4,6	6,98	0,06
1	0	2,281	2,665	4,3	6,31	0,08
1	0	2,282	2,672	4,5	6,64	0,13
1	0	2,28	2,68	4,7	7,21	0,04
1	0	2,28	2,678	4,7	7,09	0,06
1	5	2,28	2,711	5,5	9,01	5,54
1	5	2,281	2,709	5,4	8,83	5,57
1	5	2,281	2,708	5,4	8,77	5,31
1	5	2,28	2,706	5,4	8,71	5,36
1	5	2,281	2,709	5,4	8,83	5,10
1	5	2,28	2,705	5,3	8,66	5,52
1	5	2,279	2,707	5,4	8,83	4,95
1	5	2,281	2,723	5,8	9,67	5,44
1	5	2,281	2,714	5,5	9,13	6,38
1	5	2,281	2,7	5,2	8,30	5,67
1	5	2,281	2,707	5,4	8,71	5,31
1	5	2,279	2,713	5,6	9,19	5,31
1	5	2,281	2,71	5,4	8,89	6,34
1	5	2,282	2,708	5,4	8,71	5,40
1	5	2,28	2,706	5,4	8,71	5,61
1	10	2,281	2,769	7,0	12,51	9,80
1	10	2,28	2,76	6,8	12,00	11,14
1	10	2,28	2,771	7,1	12,70	11,35
1	10	2,281	2,767	7,0	12,38	10,15
1	10	2,281	2,759	6,7	11,88	10,18
1	10	2,282	2,767	6,9	12,32	10,17
1	10	2,28	2,763	6,9	12,19	10,48
1	10	2,282	2,763	6,8	12,07	12,41
1	10	2,282	2,786	7,5	13,52	11,16
1	10	2,282	2,782	7,4	13,27	14,23
1	10	2,28	2,749	6,5	11,32	15,51
1	10	2,28	2,769	7,1	12,57	11,99
1	10	2,28	2,764	6,9	12,26	11,84
1	10	2,281	2,776	7,2	12,95	14,47
1	10	2,28	2,768	7,0	12,51	12,74
1	15	2,281	2,813	8,3	15,33	17,13
1	15	2,281	2,853	9,7	17,95	17,79
1	15	2,281	2,846	9,4	17,49	16,94
1	15	2,281	2,841	9,3	17,16	18,06
1	15	2,28	2,858	9,9	18,35	18,40
1	15	2,281	2,858	9,8	18,28	17,56
1	15	2,28	2,847	9,5	17,62	15,68
1	15	2,28	2,845	9,4	17,49	15,45
1	15	2,281	2,851	9,6	17,82	15,86

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
1	15	2,282	2,84	9,2	17,03	17,71
1	15	2,28	2,85	9,6	17,82	17,85
1	15	2,28	2,852	9,7	17,95	19,72
1	15	2,28	2,832	9,0	16,63	17,33
1	15	2,282	2,856	9,7	18,08	16,98
1	15	2,282	2,848	9,5	17,56	16,74
1	20	2,28	2,902	11,4	21,27	22,24
1	20	2,282	2,922	12,1	22,47	22,33
1	20	2,28	2,916	11,9	22,20	22,56
1	20	2,28	2,968	14,0	25,64	23,02
1	20	2,282	2,972	14,0	25,77	23,24
1	20	2,282	2,966	13,8	25,38	23,22
1	20	2,28	2,926	12,3	22,87	21,13
1	20	2,28	2,928	12,4	23,00	20,81
1	20	2,281	2,92	12,0	22,40	20,42
1	20	2,28	2,916	11,9	22,20	20,58
1	20	2,282	2,916	11,9	22,07	21,01
1	20	2,28	2,922	12,2	22,60	19,89
1	20	2,282	2,93	12,4	23,00	21,26
1	20	2,282	2,924	12,2	22,60	22,98
1	20	2,282	2,932	12,5	23,13	21,71
1	25	2,282	3,026	16,3	29,26	26,39
1	25	2,28	3,02	16,2	29,01	27,00
1	25	2,282	3,032	16,6	29,64	28,21
1	25	2,282	3,128	21,1	35,46	40,04
1	25	2,279	3,124	21,1	35,40	41,63
1	25	2,279	3,106	20,2	34,35	40,09
1	25	2,282	3,058	17,8	31,27	26,56
1	25	2,28	3,056	17,8	31,27	27,86
1	25	2,28	3,064	18,1	31,76	28,67
1	25	2,28	3,068	18,3	32,01	26,19
1	25	2,282	3,048	17,3	30,65	27,89
1	25	2,28	3,056	17,8	31,27	27,18
1	25	2,284	3,05	17,3	30,65	26,51
1	25	2,282	3,049	17,4	30,71	26,01
1	25	2,279	3,059	17,9	31,52	26,19
1	30	2,28	3,184	24,1	38,67	42,97
1	30	2,279	3,163	23,1	37,59	46,48
1	30	2,279	3,169	23,4	37,92	46,46
1	30	2,278	3,202	25,2	39,72	43,97
1	30	2,278	3,188	24,4	38,99	47,61
1	30	2,279	3,182	24,1	38,62	46,99
1	30	2,28	3,2	25,0	39,51	42,53
1	30	2,279	3,168	23,3	37,86	44,00
1	30	2,28	3,172	23,5	38,03	52,09
1	30	2,28	3,19	24,4	38,99	46,32
1	30	2,278	3,182	24,1	38,67	46,33

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
1	30	2,28	3,172	23,5	38,03	42,93
1	30	2,279	3,171	23,5	38,03	43,22
1	30	2,281	3,165	23,1	37,59	40,27
1	30	2,281	3,151	22,3	36,82	41,15
2	0	2,284	2,682	4,7	7,09	0,10
2	0	2,283	2,681	4,7	7,09	0,16
2	0	2,283	2,677	4,6	6,87	0,18
2	0	2,283	2,685	4,8	7,32	0,09
2	0	2,282	2,68	4,7	7,09	0,44
2	0	2,282	2,68	4,7	7,09	0,13
2	0	2,282	2,685	4,8	7,38	0,04
2	0	2,28	2,678	4,7	7,09	1,59
2	0	2,281	2,677	4,6	6,98	1,28
2	0	2,28	2,681	4,7	7,26	1,23
2	0	2,282	2,681	4,7	7,15	0,22
2	5	2,281	2,704	5,3	8,54	5,08
2	5	2,281	2,713	5,5	9,07	4,31
2	5	2,283	2,705	5,3	8,48	6,21
2	5	2,28	2,71	5,5	8,95	6,04
2	5	2,281	2,716	5,6	9,25	5,49
2	5	2,282	2,706	5,3	8,60	5,75
2	5	2,281	2,708	5,4	8,77	5,48
2	5	2,281	2,698	5,1	8,19	5,89
2	5	2,281	2,705	5,3	8,60	6,78
2	5	2,281	2,7	5,2	8,30	7,05
2	5	2,28	2,705	5,3	8,66	8,41
2	5	2,279	2,702	5,3	8,54	7,77
2	5	2,281	2,702	5,2	8,42	5,26
2	5	2,28	2,713	5,5	9,13	5,64
2	5	2,28	2,711	5,5	9,01	5,12
2	10	2,281	2,765	6,9	12,26	13,49
2	10	2,283	2,763	6,8	12,00	12,25
2	10	2,283	2,773	7,1	12,63	12,44
2	10	2,28	2,776	7,3	13,01	12,75
2	10	2,282	2,772	7,1	12,63	11,01
2	10	2,282	2,774	7,1	12,76	10,99
2	10	2,28	2,779	7,3	13,20	10,03
2	10	2,28	2,758	6,7	11,88	11,04
2	10	2,281	2,78	7,3	13,20	11,13
2	10	2,28	2,763	6,9	12,19	11,73
2	10	2,28	2,746	6,4	11,13	11,42
2	10	2,281	2,761	6,8	12,00	10,70
2	10	2,282	2,775	7,2	12,82	11,57
2	10	2,282	2,751	6,5	11,32	8,98
2	10	2,281	2,749	6,5	11,26	11,47
2	15	2,281	2,833	9,0	16,63	16,29
2	15	2,281	2,829	8,9	16,37	17,30

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
2	15	2,281	2,835	9,1	16,77	17,96
2	15	2,28	2,834	9,1	16,77	18,06
2	15	2,281	2,839	9,2	17,03	17,02
2	15	2,281	2,847	9,5	17,56	16,30
2	15	2,281	2,832	9,0	16,57	15,90
2	15	2,28	2,834	9,1	16,77	16,48
2	15	2,28	2,836	9,1	16,90	16,07
2	15	2,283	2,839	9,1	16,90	18,79
2	15	2,281	2,838	9,2	16,96	16,88
2	15	2,28	2,843	9,4	17,36	18,72
2	15	2,282	2,824	8,7	15,98	15,30
2	15	2,281	2,806	8,1	14,87	15,79
2	15	2,281	2,824	8,7	16,05	16,11
2	20	2,281	2,915	11,9	22,07	19,51
2	20	2,283	2,903	11,3	21,14	19,32
2	20	2,281	2,905	11,5	21,40	20,92
2	20	2,281	2,913	11,8	21,94	18,61
2	20	2,282	2,911	11,7	21,74	20,35
2	20	2,281	2,925	12,2	22,73	20,04
2	20	2,282	2,92	12,0	22,34	21,72
2	20	2,282	2,914	11,8	21,94	21,05
2	20	2,281	2,917	11,9	22,20	20,43
2	20	2,281	2,919	12,0	22,34	21,66
2	20	2,281	2,913	11,8	21,94	26,11
2	20	2,281	2,893	11,0	20,61	22,26
2	20	2,282	2,912	11,7	21,80	19,41
2	20	2,28	2,91	11,7	21,80	21,13
2	20	2,281	2,917	11,9	22,20	20,04
2	23	2,282	2,986	14,6	26,69	25,14
2	23	2,281	2,994	15,0	27,27	26,74
2	23	2,282	3,004	15,4	27,85	26,96
2	25	2,281	3,045	17,2	30,52	35,78
2	25	2,281	3,043	17,1	30,40	34,03
2	25	2,281	3,049	17,4	30,77	34,41
2	25	2,281	3,113	20,4	34,65	26,66
2	25	2,282	3,11	20,2	34,41	28,83
2	25	2,281	3,099	19,7	33,82	28,77
2	25	2,282	3,057	17,7	31,21	35,29
2	25	2,282	3,028	16,4	29,39	36,52
2	25	2,282	3,066	18,1	31,76	37,77
2	25	2,281	3,122	20,9	35,17	27,99
2	25	2,281	3,128	21,2	35,51	30,86
2	25	2,281	3,131	21,3	35,69	29,71
2	25	2,281	3,09	19,3	33,28	47,19
2	25	2,281	3,069	18,3	32,01	43,46
2	25	2,281	3,067	18,2	31,89	44,77
2	30	2,281	3,177	23,7	38,24	43,22

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
2	30	2,281	3,181	23,9	38,46	47,64
2	30	2,281	3,181	23,9	38,46	44,76
2	30	2,28	3,216	25,8	40,33	46,29
2	30	2,28	3,208	25,4	39,93	47,11
2	30	2,281	3,189	24,3	38,88	44,69
2	30	2,28	3,186	24,2	38,78	24,97
2	30	2,28	3,18	23,9	38,46	23,29
2	30	2,28	3,181	23,9	38,51	25,60
2	30	2,28	3,166	23,2	37,70	45,09
2	30	2,28	3,168	23,3	37,81	19,23
2	30	2,28	3,152	22,4	36,93	18,57
5	0	2,283	2,681	4,7	7,09	0,22
5	0	2,282	2,683	4,7	7,26	0,37
5	0	2,282	2,679	4,6	7,04	0,43
5	5	2,282	2,71	5,4	8,83	4,40
5	5	2,283	2,699	5,1	8,13	4,03
5	5	2,282	2,707	5,3	8,66	4,60
5	5	2,281	2,699	5,2	8,24	3,66
5	5	2,282	2,697	5,1	8,07	3,63
5	5	2,282	2,71	5,4	8,83	4,25
5	5	2,282	2,701	5,2	8,30	6,30
5	5	2,281	2,704	5,3	8,54	5,17
5	5	2,281	2,705	5,3	8,60	4,65
5	10	2,282	2,768	7,0	12,38	4,15
5	10	2,281	2,774	7,2	12,82	1,46
5	10	2,282	2,784	7,4	13,40	7,37
5	10	2,281	2,778	7,3	13,08	5,54
5	10	2,281	2,773	7,1	12,76	5,02
5	10	2,28	2,76	6,8	12,00	5,79
5	10	2,281	2,765	6,9	12,26	5,60
5	10	2,282	2,75	6,5	11,26	9,50
5	10	2,281	2,746	6,4	11,07	10,29
5	10	2,282	2,739	6,2	10,58	11,16
5	10	2,282	2,765	6,9	12,19	10,18
5	10	2,282	2,76	6,7	11,88	10,05
5	10	2,281	2,769	7,0	12,51	9,54
5	15	2,283	2,833	8,9	16,50	4,05
5	15	2,282	2,831	8,9	16,44	7,09
5	15	2,281	2,834	9,0	16,70	6,40
5	15	2,282	2,823	8,6	15,91	10,76
5	15	2,282	2,824	8,7	15,98	9,97
5	15	2,281	2,823	8,7	15,98	9,46
5	15	2,282	2,831	8,9	16,44	12,59
5	15	2,282	2,832	8,9	16,50	13,54
5	15	2,28	2,824	8,7	16,11	14,27
5	15	2,282	2,832	8,9	16,50	18,58
5	15	2,281	2,839	9,2	17,03	18,00

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
5	15	2,281	2,832	9,0	16,57	17,84
5	15	2,282	2,847	9,4	17,49	15,80
5	15	2,282	2,83	8,9	16,37	17,43
5	15	2,282	2,827	8,8	16,18	15,33
5	20	2,282	2,922	12,1	22,47	9,97
5	20	2,282	2,91	11,6	21,67	10,76
5	20	2,281	2,921	12,1	22,47	8,81
5	20	2,282	2,904	11,4	21,27	15,46
5	20	2,281	2,89	10,9	20,41	15,62
5	20	2,282	2,919	12,0	22,27	16,58
5	20	2,281	2,901	11,3	21,14	16,26
5	20	2,281	2,907	11,6	21,54	16,18
5	20	2,281	2,903	11,4	21,27	13,60
5	20	2,283	2,91	11,6	21,60	20,98
5	20	2,282	2,902	11,3	21,14	22,09
5	20	2,281	2,913	11,8	21,94	21,39
5	20	2,283	2,903	11,3	21,14	20,69
5	20	2,281	2,901	11,3	21,14	20,94
5	20	2,282	2,905	11,4	21,34	20,85
5	23	2,281	2,948	13,1	24,26	20,23
5	23	2,282	2,971	14,0	25,71	24,04
5	23	2,281	2,98	14,4	26,36	20,58
5	23	2,281	2,921	12,1	22,47	23,54
5	23	2,282	2,974	14,1	25,90	24,25
5	23	2,281	2,962	13,7	25,18	23,58
5	23	2,282	2,973	14,1	25,84	22,82
5	23	2,282	2,968	13,9	25,51	22,06
5	23	2,281	2,963	13,7	25,25	22,65
5	25	2,282	3,079	18,7	32,56	20,12
5	25	2,282	3,09	19,3	33,22	21,52
5	25	2,281	3,11	20,3	34,47	19,81
5	25	2,281	3,117	20,6	34,88	29,64
5	25	2,282	3,114	20,4	34,65	28,61
5	25	2,282	3,112	20,3	34,53	28,33
5	25	2,283	3,121	20,7	34,99	32,56
5	25	2,28	3,13	21,3	35,69	35,42
5	25	2,28	3,109	20,3	34,47	34,95
5	25	2,282	3,104	19,9	34,06	34,25
5	25	2,282	3,108	20,1	34,29	32,42
5	25	2,281	3,087	19,2	33,10	36,02
5	25	2,282	3,087	19,1	33,04	29,77
5	25	2,282	3,075	18,6	32,31	30,74
5	25	2,282	3,049	17,4	30,71	32,54
5	27	2,28	3,172	23,5	38,03	37,00
5	27	2,28	3,174	23,6	38,13	42,79
5	27	2,279	3,17	23,4	37,97	34,22
5	30	2,282	3,192	24,4	38,99	46,56

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
5	30	2,28	3,194	24,6	39,20	38,13
5	30	2,28	3,18	23,9	38,46	35,07
10	0	2,282	2,687	4,8	7,49	1,02
10	0	2,281	2,686	4,8	7,49	1,54
10	0	2,282	2,69	4,9	7,67	1,07
10	0	2,281	2,688	4,9	7,61	1,93
10	0	2,281	2,687	4,9	7,55	1,47
10	0	2,282	2,686	4,8	7,44	1,33
10	0	2,282	2,682	4,7	7,21	1,31
10	0	2,282	2,681	4,7	7,15	0,00
10	0	2,281	2,688	4,9	7,61	0,35
10	0	2,283	2,691	4,9	7,67	0,04
10	0	2,282	2,69	4,9	7,67	0,18
10	5	2,282	2,718	5,6	9,31	5,76
10	5	2,283	2,713	5,5	8,95	6,08
10	5	2,281	2,71	5,4	8,89	5,78
10	5	2,283	2,706	5,3	8,54	7,34
10	5	2,282	2,717	5,6	9,25	7,14
10	5	2,28	2,698	5,2	8,24	7,38
10	5	2,281	2,707	5,4	8,71	3,78
10	5	2,281	2,708	5,4	8,77	4,48
10	5	2,28	2,702	5,3	8,48	4,25
10	5	2,282	2,703	5,2	8,42	6,09
10	5	2,283	2,693	5,0	7,78	4,96
10	5	2,282	2,701	5,2	8,30	6,30
10	5	2,282	2,713	5,5	9,01	7,00
10	5	2,282	2,718	5,6	9,31	7,32
10	5	2,283	2,698	5,1	8,07	7,57
10	10	2,282	2,753	6,5	11,44	11,37
10	10	2,282	2,773	7,1	12,70	12,49
10	10	2,281	2,779	7,3	13,14	11,31
10	10	2,282	2,77	7,0	12,51	13,82
10	10	2,281	2,758	6,7	11,82	12,57
10	10	2,282	2,771	7,1	12,57	12,13
10	10	2,281	2,761	6,8	12,00	8,00
10	10	2,28	2,756	6,7	11,75	10,55
10	10	2,281	2,755	6,6	11,63	10,24
10	10	2,283	2,768	6,9	12,32	11,56
10	10	2,282	2,751	6,5	11,32	12,61
10	10	2,282	2,76	6,7	11,88	11,63
10	10	2,284	2,76	6,7	11,75	14,24
10	10	2,283	2,765	6,9	12,13	12,60
10	10	2,283	2,778	7,2	12,95	13,65
10	15	2,281	2,816	8,4	15,52	16,90
10	15	2,282	2,835	9,0	16,70	18,37
10	15	2,281	2,83	8,9	16,44	16,95
10	15	2,282	2,844	9,3	17,29	21,73

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
10	15	2,282	2,837	9,1	16,83	20,00
10	15	2,281	2,851	9,6	17,82	19,84
10	15	2,28	2,823	8,7	16,05	18,36
10	15	2,281	2,826	8,8	16,18	17,17
10	15	2,281	2,834	9,0	16,70	16,49
10	15	2,283	2,821	8,5	15,72	17,79
10	15	2,282	2,848	9,5	17,56	17,76
10	15	2,282	2,833	9,0	16,57	17,00
10	15	2,282	2,832	8,9	16,50	19,29
10	15	2,282	2,846	9,4	17,42	19,85
10	15	2,282	2,815	8,4	15,39	18,95
10	20	2,282	2,9	11,3	21,01	20,44
10	20	2,282	2,892	11,0	20,47	21,49
10	20	2,282	2,919	12,0	22,27	21,02
10	20	2,282	2,882	10,6	19,81	22,09
10	20	2,282	2,873	10,3	19,21	23,10
10	20	2,283	2,905	11,4	21,27	24,56
10	20	2,281	2,907	11,6	21,54	19,44
10	20	2,281	2,886	10,8	20,14	18,27
10	20	2,281	2,912	11,7	21,87	18,97
10	20	2,283	2,937	12,6	23,40	24,85
10	20	2,282	2,93	12,4	23,00	22,14
10	20	2,282	2,929	12,3	22,93	23,94
10	20	2,282	2,903	11,4	21,21	21,31
10	20	2,282	2,894	11,0	20,61	22,23
10	20	2,283	2,859	9,8	18,22	21,65
10	23	2,282	2,972	14,0	25,77	24,06
10	23	2,281	3,002	15,3	27,79	22,33
10	23	2,282	2,98	14,4	26,29	23,48
10	23	2,283	3,068	18,2	31,82	30,12
10	23	2,282	3,072	18,4	32,13	31,33
10	23	2,281	3,077	18,7	32,50	31,25
10	23	2,283	3,005	15,4	27,85	26,58
10	23	2,282	2,964	13,7	25,25	25,63
10	23	2,282	2,989	14,7	26,88	26,15
10	25	2,28	3,124	21,0	35,34	35,90
10	25	2,281	3,141	21,8	36,26	35,53
10	25	2,282	3,127	21,1	35,40	37,69
10	25	2,282	3,15	22,2	36,71	40,74
10	25	2,281	3,161	22,8	37,37	37,63
10	25	2,282	3,146	22,0	36,48	39,12
10	25	2,283	3,11	20,2	34,35	31,81
10	25	2,282	3,114	20,4	34,65	35,72
10	25	2,281	3,11	20,3	34,47	35,36
10	25	2,282	3,136	21,5	35,92	39,12
10	25	2,281	3,151	22,3	36,82	40,67
10	25	2,281	3,143	21,9	36,37	41,51

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
10	25	2,281	3,102	19,9	34,00	33,54
10	25	2,28	3,122	20,9	35,23	36,36
10	25	2,281	3,13	21,3	35,63	36,94
27	0	2,281	2,697	5,1	8,13	0,34
27	0	2,282	2,703	5,2	8,42	0,13
27	0	2,283	2,701	5,2	8,24	2,70
27	0	2,282	2,699	5,1	8,19	2,04
27	0	2,283	2,694	5,0	7,84	2,03
27	0	2,283	2,703	5,2	8,36	2,90
27	0	2,28	2,699	5,2	8,30	1,92
27	0	2,28	2,701	5,2	8,42	2,46
27	0	2,279	2,697	5,2	8,24	2,07
27	0	2,281	2,703	5,3	8,48	0,45
27	0	2,281	2,713	5,5	9,07	0,29
27	0	2,281	2,711	5,5	8,95	0,37
27	0	2,282	2,696	5,1	8,01	0,64
27	0	2,281	2,695	5,1	8,01	0,38
27	0	2,28	2,696	5,1	8,13	0,15
27	5	2,282	2,704	5,3	8,48	7,14
27	5	2,282	2,709	5,4	8,77	7,31
27	5	2,281	2,684	4,8	7,38	7,99
27	5	2,282	2,709	5,4	8,77	8,51
27	5	2,283	2,715	5,5	9,07	7,80
27	5	2,283	2,718	5,6	9,25	8,58
27	5	2,281	2,698	5,3	8,48	6,99
27	5	2,281	2,693	5,5	9,07	4,61
27	5	2,282	2,7	5,5	8,95	8,28
27	5	2,282	2,697	5,1	8,01	5,14
27	5	2,283	2,696	5,1	8,01	6,05
27	5	2,282	2,693	5,1	8,13	5,87
27	5	2,282	2,702	5,2	8,36	6,32
27	5	2,282	2,707	5,3	8,66	6,71
27	5	2,281	2,69	4,9	7,72	5,77
27	10	2,281	2,747	6,4	11,13	18,69
27	10	2,282	2,763	6,8	12,07	12,92
27	10	2,281	2,75	6,5	11,32	15,26
27	10	2,283	2,769	7,0	12,38	14,90
27	10	2,281	2,767	7,0	12,38	15,70
27	10	2,282	2,755	6,6	11,57	14,70
27	10	2,281	2,744	6,3	10,95	10,81
27	10	2,279	2,759	6,8	12,00	11,47
27	10	2,282	2,719	5,6	9,37	15,56
27	10	2,281	2,753	5,1	8,19	13,52
27	10	2,282	2,768	5,0	7,90	11,83
27	10	2,282	2,781	5,2	8,24	15,39
27	10	2,28	2,762	6,9	12,13	12,93
27	10	2,282	2,753	6,5	11,44	13,64

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
27	10	2,283	2,753	6,5	11,38	13,45
27	15	2,281	2,822	8,6	15,91	20,59
27	15	2,281	2,825	8,7	16,11	19,09
27	15	2,279	2,819	8,6	15,85	19,23
27	15	2,281	2,847	9,5	17,56	19,83
27	15	2,282	2,821	8,6	15,78	19,33
27	15	2,283	2,834	9,0	16,57	19,84
27	15	2,28	2,773	7,2	12,82	18,56
27	15	2,281	2,833	9,0	16,63	18,92
27	15	2,281	2,812	8,3	15,26	15,23
27	15	2,282	2,822	8,6	15,85	16,14
27	15	2,282	2,766	6,9	12,26	17,17
27	15	2,283	2,813	8,3	15,20	17,61
27	15	2,28	2,834	9,1	16,77	18,41
27	15	2,281	2,839	9,2	17,03	16,44
27	15	2,281	2,833	9,0	16,63	17,98
27	20	2,282	2,911	11,7	21,74	24,05
27	20	2,281	2,912	11,7	21,87	24,20
27	20	2,282	2,928	12,3	22,87	23,80
27	20	2,281	2,938	12,7	23,60	24,57
27	20	2,283	2,905	11,4	21,27	25,88
27	20	2,282	2,919	12,0	22,27	27,38
27	20	2,282	2,89	10,9	20,34	25,47
27	20	2,281	2,911	11,7	21,80	23,29
27	20	2,281	2,889	10,9	20,34	23,43
27	20	2,282	2,863	6,6	11,50	21,03
27	20	2,281	2,86	7,0	12,38	23,05
27	20	2,282	2,863	7,3	13,20	21,56
27	20	2,28	2,915	11,9	22,14	22,91
27	20	2,279	2,883	10,8	20,07	23,71
27	20	2,282	2,924	12,2	22,60	24,33
27	23	2,282	3,092	19,4	33,34	38,03
27	23	2,281	3,038	16,9	30,08	39,04
27	23	2,281	3,096	19,6	33,64	35,73
27	23	2,281	3,125	21,0	35,34	36,35
27	23	2,282	3,107	20,1	34,23	36,77
27	23	2,282	3,13	21,2	35,57	36,39
27	23	2,281	3,114	20,5	34,70	35,11
27	23	2,281	3,123	20,9	35,23	36,16
27	23	2,28	3,105	20,1	34,23	37,50
27	23	2,282	3,113	20,4	34,59	38,58
27	23	2,28	3,117	20,7	34,94	37,60
27	23	2,281	3,12	20,8	35,05	38,53
27	23	2,281	3,097	19,6	33,70	33,26
27	23	2,281	3,096	19,6	33,64	34,40
27	23	2,281	3,119	20,7	34,99	38,54
27	25	2,28	3,132	21,4	35,80	37,61

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
27	25	2,281	3,147	22,1	36,59	37,52
27	25	2,282	3,16	22,7	37,26	39,10
27	25	2,283	3,167	23,1	37,59	36,56
27	25	2,281	3,164	23,0	37,54	37,54
27	25	2,281	3,144	22,0	36,43	36,42
27	25	2,281	3,169	23,3	37,81	35,78
27	25	2,279	3,186	24,3	38,83	38,98
27	25	2,279	3,188	24,4	38,94	35,80
27	25	2,282	3,165	23,0	37,54	40,39
27	25	2,281	3,147	22,1	36,59	39,33
27	25	2,281	3,145	22,0	36,48	34,99
27	25	2,28	3,129	21,3	35,63	32,90
27	25	2,282	3,119	20,7	34,94	35,76
27	25	2,281	3,139	21,7	36,14	34,50
46	0	2,282	2,696	5,1	8,01	1,77
46	0	2,283	2,704	5,2	8,42	1,10
46	0	2,283	2,697	5,1	8,01	1,61
46	0	2,28	2,704	5,3	8,60	0,41
46	0	2,28	2,7	5,2	8,36	0,23
46	0	2,281	2,698	5,1	8,19	0,04
46	0	2,282	2,711	5,4	8,89	0,02
46	0	2,283	2,7	5,1	8,19	0,77
46	0	2,282	2,705	5,3	8,54	0,54
46	0	2,282	2,701	5,2	8,30	0,69
46	0	2,283	2,705	5,3	8,48	0,48
46	0	2,282	2,704	5,3	8,48	0,24
46	5	2,282	2,695	5,0	7,95	7,19
46	5	2,282	2,71	5,4	8,83	7,89
46	5	2,281	2,708	5,4	8,77	7,88
46	5	2,281	2,707	5,4	8,71	7,82
46	5	2,281	2,716	5,6	9,25	6,08
46	5	2,281	2,693	5,0	7,90	7,49
46	5	2,283	2,703	5,2	8,36	7,74
46	5	2,283	2,735	6,0	10,27	7,38
46	5	2,282	2,715	5,5	9,13	7,25
46	5	2,283	2,713	5,5	8,95	5,08
46	5	2,282	2,705	5,3	8,54	4,99
46	5	2,282	2,726	5,8	9,79	5,18
46	10	2,281	2,758	6,7	11,82	13,13
46	10	2,282	2,77	7,0	12,51	13,21
46	10	2,28	2,776	7,3	13,01	11,88
46	10	2,281	2,747	6,4	11,13	10,27
46	10	2,281	2,772	7,1	12,70	11,33
46	10	2,282	2,759	6,7	11,82	10,56
46	10	2,282	2,779	7,3	13,08	11,39
46	10	2,282	2,739	6,2	10,58	12,60
46	10	2,283	2,74	6,2	10,58	12,10

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
46	10	2,281	2,741	6,2	10,76	8,94
46	10	2,281	2,755	6,6	11,63	8,42
46	10	2,282	2,751	6,5	11,32	9,43
46	10	2,282	2,757	6,7	11,69	4,67
46	10	2,283	2,772	7,1	12,57	9,26
46	10	2,281	2,786	7,5	13,59	9,21
46	15	2,281	2,84	9,2	17,10	17,02
46	15	2,282	2,809	8,2	15,00	17,36
46	15	2,281	2,822	8,6	15,91	18,18
46	15	2,281	2,812	8,3	15,26	17,95
46	15	2,282	2,822	8,6	15,85	13,83
46	15	2,282	2,825	8,7	16,05	15,94
46	15	2,283	2,811	8,2	15,07	19,86
46	15	2,282	2,801	7,9	14,49	18,54
46	15	2,281	2,783	7,4	13,40	16,96
46	15	2,28	2,822	8,7	15,98	16,59
46	15	2,281	2,818	8,5	15,65	16,65
46	15	2,282	2,81	8,2	15,07	15,20
46	15	2,283	2,794	7,7	13,97	16,28
46	15	2,282	2,835	9,0	16,70	16,17
46	17	2,282	2,91	11,6	21,67	19,36
46	17	2,282	2,896	11,1	20,74	21,53
46	17	2,284	2,894	11,0	20,47	19,66
46	17	2,281	2,877	6,2	10,76	18,34
46	17	2,281	2,927	6,6	11,63	14,54
46	17	2,282	2,922	6,5	11,32	15,74
46	17	2,282	2,876	10,4	19,41	20,18
46	17	2,283	2,856	9,7	18,02	17,88
46	17	2,282	2,861	9,9	18,42	19,13
46	20	2,281	3,12	20,8	35,05	28,56
46	20	2,281	3,141	21,8	36,26	26,11
46	20	2,282	3,147	22,1	36,54	30,73
46	20	2,281	3,121	20,8	35,11	28,90
46	20	2,28	3,147	22,2	36,65	26,72
46	20	2,281	3,14	21,8	36,20	31,22
46	20	2,282	3,124	20,9	35,23	27,68
46	20	2,282	3,153	22,4	36,87	27,31
46	20	2,281	3,149	22,2	36,71	27,79
46	20	2,282	3,115	20,5	34,70	21,09
46	20	2,281	3,118	20,7	34,94	23,16
46	20	2,28	3,128	21,2	35,57	19,30
46	20	2,282	3,119	20,7	34,94	23,63
46	20	2,281	3,134	21,5	35,86	25,11
46	20	2,28	3,128	21,2	35,57	20,58
46	23	2,281	3,181	23,9	38,46	30,03
46	23	2,282	3,168	23,2	37,70	28,61
46	23	2,281	3,184	24,1	38,62	27,77

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
46	23	2,281	3,177	23,7	38,24	27,16
46	23	2,28	3,191	24,5	39,04	27,12
46	23	2,28	3,188	24,3	38,88	30,20
46	23	2,281	3,175	23,6	38,13	29,96
46	23	2,28	3,223	26,2	40,69	29,52
46	23	2,277	3,172	23,6	38,19	28,59
46	23	2,282	3,161	22,8	37,32	27,64
46	23	2,279	3,179	23,9	38,46	25,97
46	23	2,278	3,166	23,3	37,81	27,15
46	23	2,28	3,192	24,5	39,09	24,88
46	23	2,281	3,198	24,8	39,36	25,15
46	23	2,278	3,191	24,6	39,15	23,83
55	0	2,284	2,705	5,2	8,42	2,89
55	0	2,283	2,704	5,2	8,42	2,88
55	0	2,283	2,707	5,3	8,60	3,37
55	0	2,283	2,708	5,3	8,66	0,90
55	0	2,282	2,705	5,3	8,54	1,26
55	0	2,282	2,7	5,2	8,24	2,42
55	0	2,28	2,71	5,5	8,95	0,94
55	0	2,282	2,703	5,2	8,42	1,02
55	0	2,281	2,703	5,3	8,48	1,00
55	5	2,281	2,699	5,2	8,24	6,99
55	5	2,282	2,713	5,5	9,01	6,89
55	5	2,282	2,705	5,3	8,54	7,25
55	5	2,282	2,71	5,4	8,83	4,67
55	5	2,282	2,71	5,4	8,83	3,81
55	5	2,282	2,713	5,5	9,01	4,02
55	5	2,281	2,718	5,6	9,37	5,43
55	5	2,282	2,704	5,3	8,48	5,65
55	5	2,281	2,715	5,6	9,19	8,41
55	5	2,281	2,715	5,6	9,19	4,66
55	5	2,282	2,739	6,2	10,58	5,25
55	5	2,281	2,714	5,5	9,13	6,00
55	5	2,282	2,73	5,9	10,03	6,06
55	5	2,281	2,712	5,5	9,01	6,06
55	5	2,283	2,715	5,5	9,07	5,21
55	10	2,282	2,763	6,8	12,07	13,93
55	10	2,282	2,766	6,9	12,26	12,14
55	10	2,282	2,789	7,6	13,71	12,12
55	10	2,283	2,76	6,7	11,82	12,85
55	10	2,282	2,767	6,9	12,32	11,84
55	10	2,282	2,752	6,5	11,38	12,85
55	10	2,283	2,721	5,7	9,43	10,46
55	10	2,281	2,741	6,2	10,76	10,45
55	10	2,281	2,784	7,5	13,46	9,57
55	10	2,28	2,756	6,7	11,75	10,77
55	10	2,28	2,752	6,6	11,50	9,70

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
55	10	2,281	2,758	6,7	11,82	9,98
55	10	2,281	2,729	5,9	10,03	9,76
55	10	2,282	2,748	6,4	11,13	11,87
55	10	2,281	2,754	6,6	11,57	9,68
55	15	2,282	2,841	9,2	17,10	19,12
55	15	2,282	2,885	10,7	20,01	19,06
55	15	2,28	2,881	10,7	19,88	17,36
55	15	2,281	2,888	10,9	20,27	17,24
55	15	2,281	2,882	10,7	19,88	16,77
55	15	2,281	2,896	11,2	20,81	16,53
55	15	2,282	2,812	8,3	15,20	16,34
55	15	2,282	2,849	9,5	17,62	14,54
55	15	2,282	2,889	10,9	20,27	18,39
55	15	2,281	2,825	8,7	16,11	16,52
55	15	2,28	2,822	8,7	15,98	15,31
55	15	2,281	2,867	10,1	18,88	16,68
55	15	2,282	2,863	10,0	18,55	17,22
55	15	2,281	2,881	10,6	19,81	16,06
55	15	2,282	2,864	10,0	18,61	17,24
55	17	2,282	3,078	18,7	32,50	26,18
55	17	2,28	3,088	19,3	33,22	27,42
55	17	2,28	3,116	20,6	34,88	22,73
55	17	2,282	3,079	18,7	32,56	18,30
55	17	2,28	3,118	20,7	34,99	16,30
55	17	2,281	3,144	22,0	36,43	18,48
55	17	2,282	3,075	18,6	32,31	19,33
55	17	2,281	3,115	20,5	34,76	20,55
55	17	2,28	3,108	20,2	34,41	21,98
55	17	2,28	3,035	16,8	29,96	20,06
55	17	2,28	3,058	17,9	31,39	18,87
55	17	2,281	3,095	19,5	33,58	19,62
55	17	2,281	3,057	17,8	31,27	19,04
55	17	2,281	3,047	17,3	30,65	17,63
55	17	2,28	3,085	19,1	33,04	17,86
55	20	2,283	3,15	22,2	36,65	26,90
55	20	2,282	3,151	22,3	36,76	27,01
55	20	2,28	3,167	23,2	37,76	27,25
55	20	2,28	3,171	23,4	37,97	24,45
55	20	2,28	3,178	23,8	38,35	22,78
55	20	2,281	3,183	24,0	38,56	20,17
55	20	2,282	3,181	23,8	38,40	23,22
55	20	2,282	3,18	23,8	38,35	21,54
55	20	2,282	3,174	23,5	38,03	23,31
55	20	2,28	3,152	22,4	36,93	21,87
55	20	2,279	3,162	23,0	37,54	23,49
55	20	2,28	3,151	22,4	36,87	20,66
55	20	2,28	3,182	24,0	38,56	24,78

Contingut de graves (% pes/pes)	Nivell humitat (% vol/vol)	Primera refracció	Segona refracció	Permitivitat	Contingut aigua TDR (% vol/vol)	Contingut aigua MR (% vol/vol)
55	20	2,279	3,154	22,6	37,10	24,77
55	20	2,28	3,162	22,9	37,48	24,37
55	23	2,281	3,196	24,7	39,25	26,59
55	23	2,281	3,208	25,3	39,87	26,91
55	23	2,28	3,22	26,1	40,54	26,76
55	23	2,281	3,213	25,6	40,13	23,92
55	23	2,281	3,207	25,3	39,82	25,22
55	23	2,28	3,195	24,7	39,25	22,93
55	23	2,28	3,191	24,5	39,04	25,54
55	23	2,28	3,199	24,9	39,46	24,36
55	23	2,279	3,193	24,6	39,20	24,80
55	23	2,279	3,208	25,5	39,98	27,23
55	23	2,278	3,209	25,6	40,08	26,92
55	23	2,279	3,197	24,9	39,41	28,66
55	23	2,277	3,175	23,8	38,35	25,62
55	23	2,278	3,203	25,2	39,77	25,71
55	23	2,279	3,201	25,1	39,62	27,02

ANNEX II

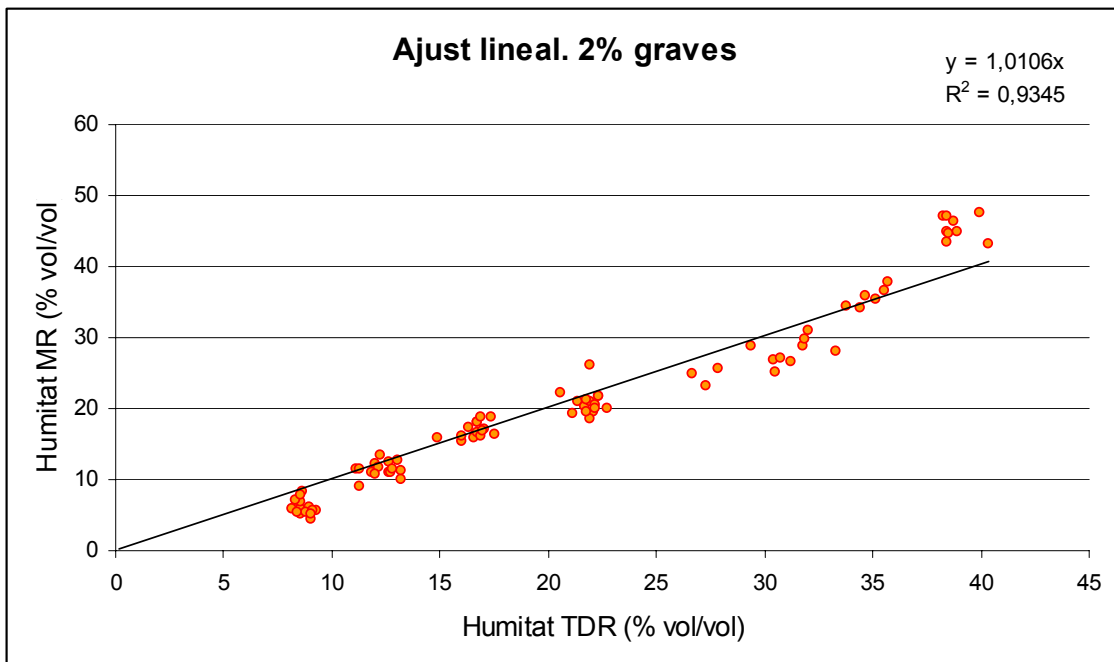
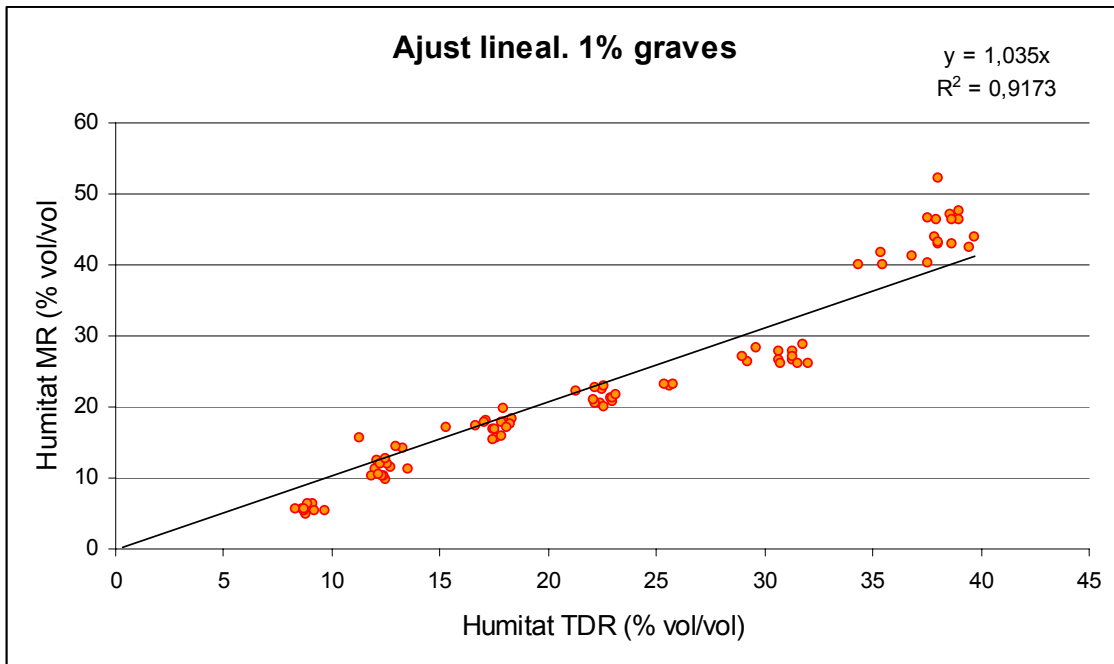
Annex de resultats: Densitat Aparent

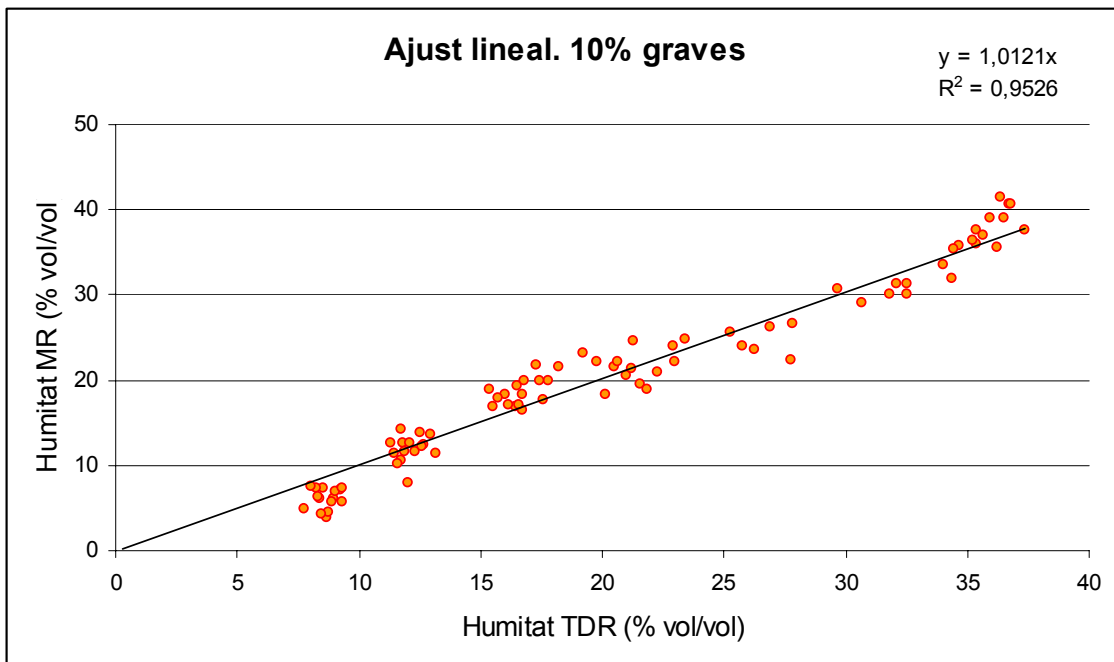
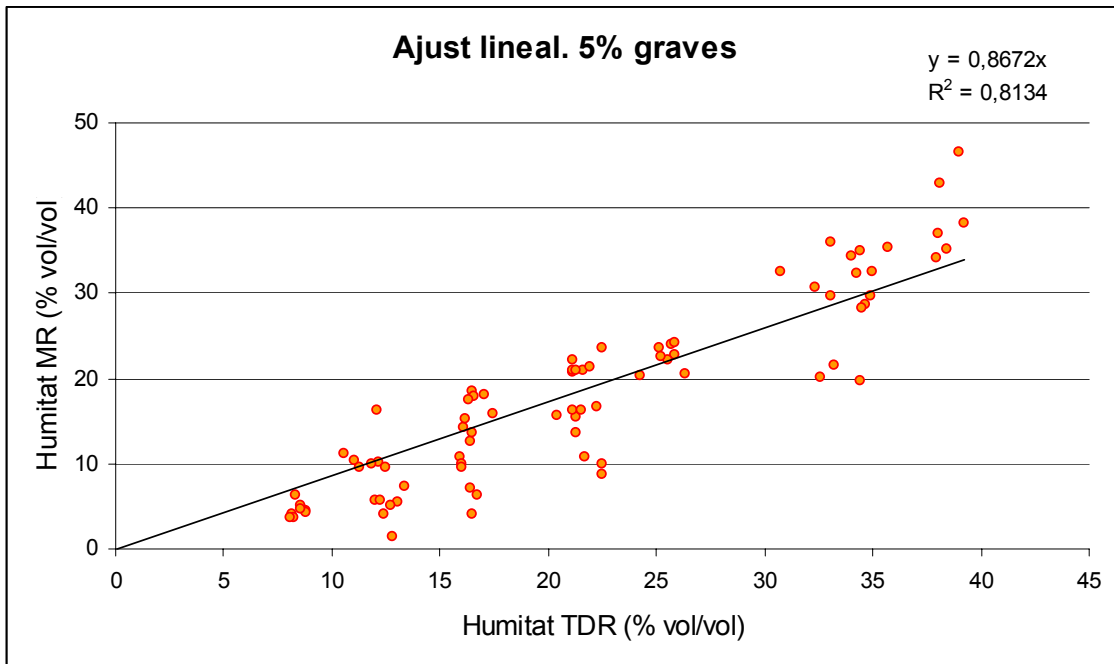
Contingut de graves (% pes/pes)	DA (g/cm ³)	Porositat % (vol/vol)
0	1,86	29,64
	1,86	29,64
	1,86	29,80
	1,85	30,36
	1,92	27,65
1	1,88	28,98
	1,88	28,98
	1,88	29,13
	1,86	29,62
	1,94	26,98
2	1,90	28,24
	1,90	28,31
	1,90	28,47
	1,93	27,26
	1,96	26,09
5	1,92	27,64
	1,91	27,79
	1,92	27,65
	1,99	24,75
	2,04	23,12
10	1,96	25,94
	1,95	26,46
	1,96	25,87
	1,94	26,89
	1,96	26,09
27	2,07	21,93
	2,05	22,60
	2,07	21,85
	2,06	22,31
	2,04	23,04

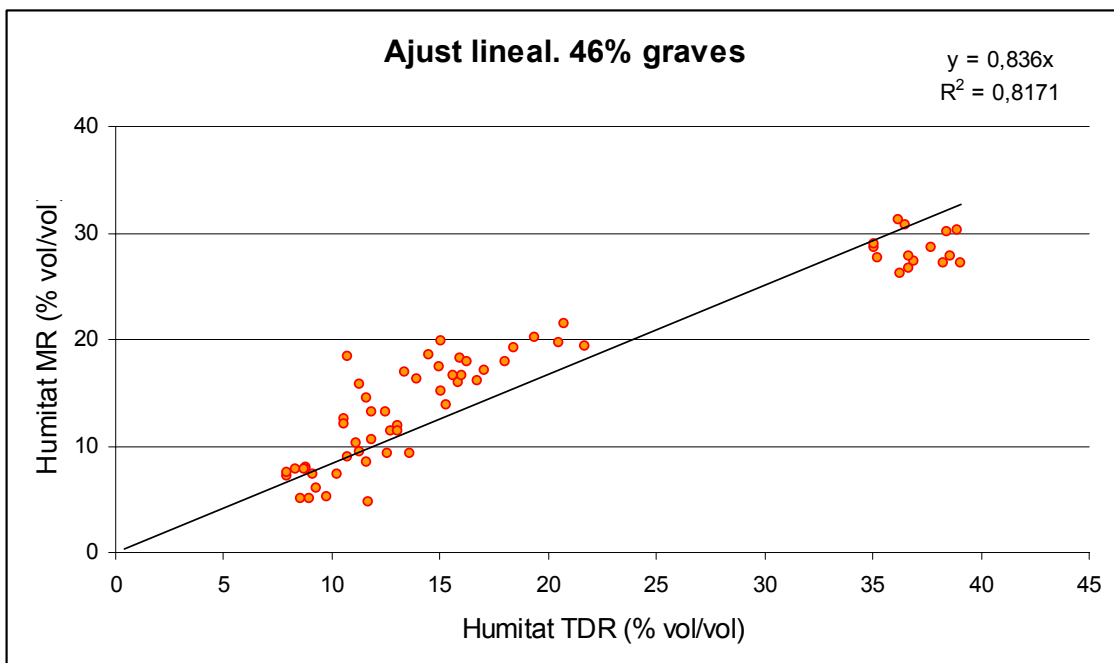
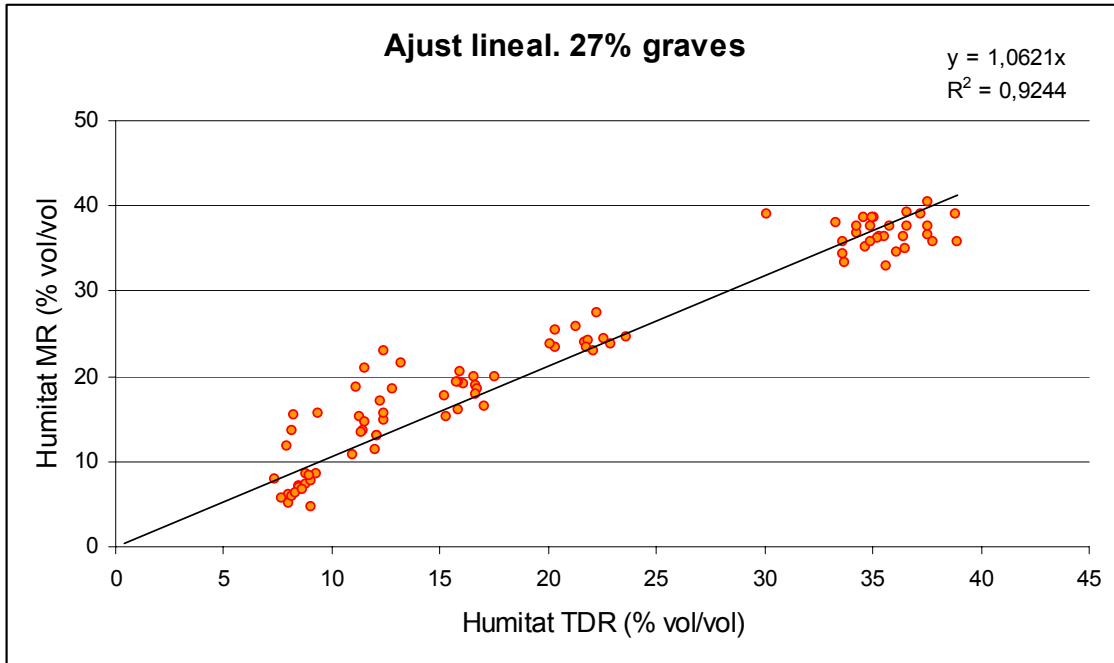
Contingut de graves (% pes/pes)	DA (g/cm ³)	Porositat % (vol/vol)
46	2,02	23,79
	2,08	21,56
	2,10	20,76
	2,08	21,41
55	2,02	23,79
	2,03	23,49
	2,04	22,97
	2,02	23,86
	2,11	20,52

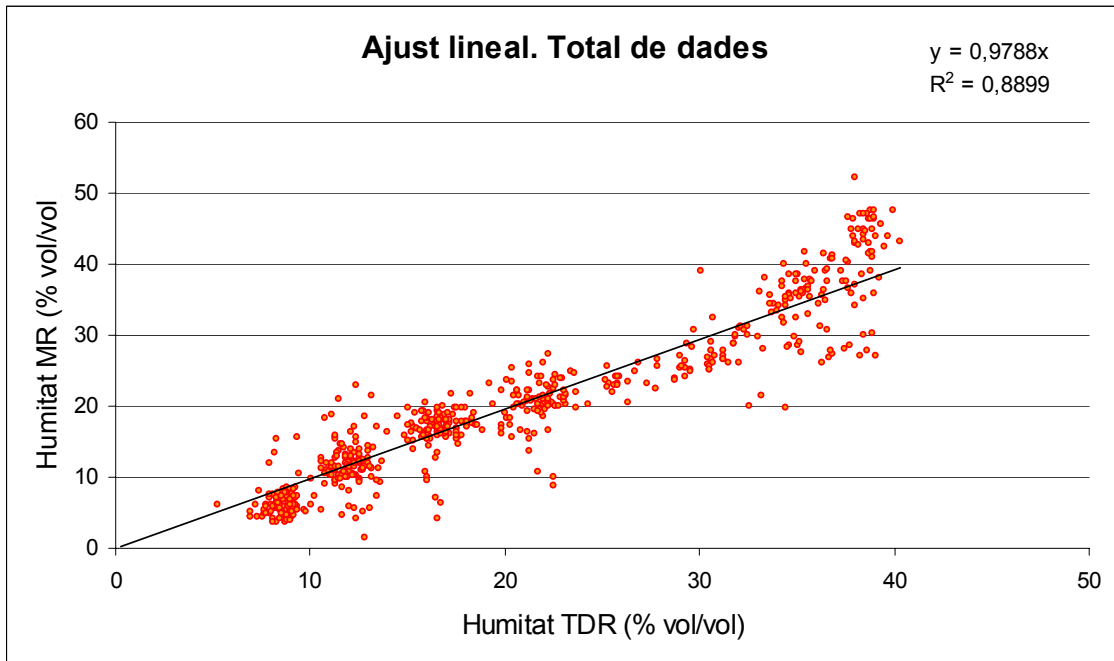
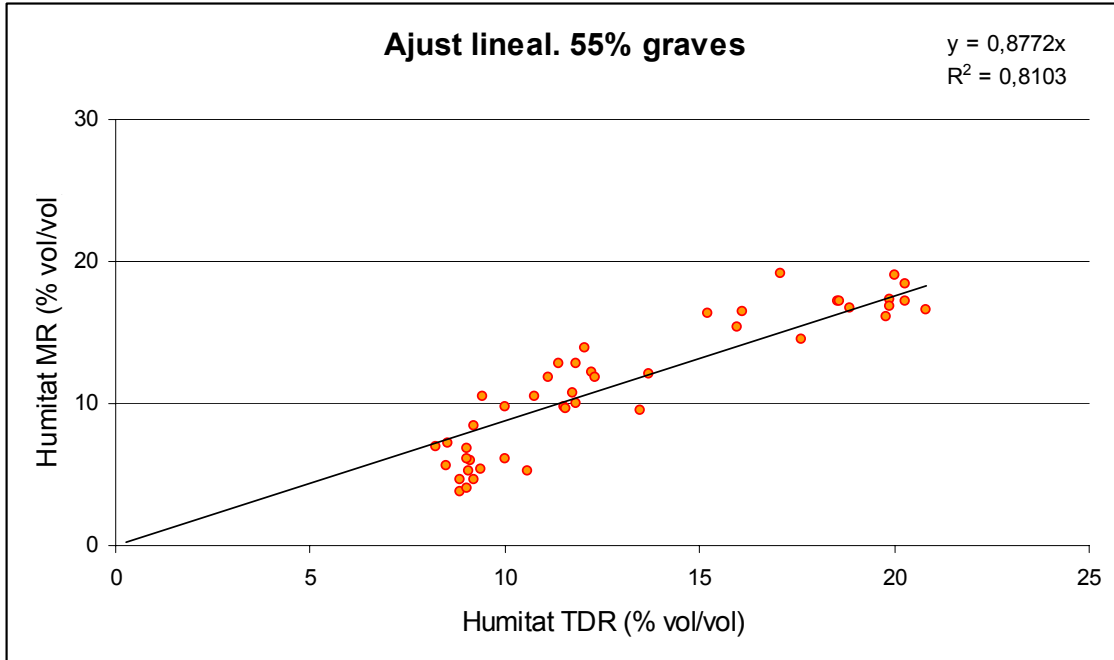
ANEX III

Annex de resultats: Ajust lineal









Annex IV

Annex de resultats: Ajust polinòmic

