



UNIVERSIDADE DA CORUÑA
FACULTAD DE CIENCIAS
ÁREA DE EDAFOLOGÍA Y QUÍMICA AGRÍCOLA

TESIS DOCTORAL

AMPLIACIÓN DEL PERFIL DE SUELOS EROSIONADOS
Y COMPACTADOS MEDIANTE SUBSOLADO
CON ENMIENDA CÁLCICA PROFUNDA



RODOLFO
MORARZO
2008



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

FACULTAD DE CIENCIAS

ÁREA DE EDAFOLOGÍA Y QUÍMICA AGRÍCOLA

TESIS DOCTORAL

AMPLIACIÓN DEL PERFIL DE SUELOS EROSIONADOS
Y COMPACTADOS MEDIANTE SUBSOLADO
CON ENMIENDA CÁLCICA PROFUNDA

Presentada por:

Rodolfo Mon

Directores:

Antonio Paz González

Marcos Lado Liñares

Roberto Santamaría

MARZO 200 8



Área de Edafología y Química Agrícola

D. **Antonio PAZ GONZÁLEZ**, Catedrático de Edafología y Química Agrícola de la Universidade da Coruña, D. **Marcos LADO LIÑARES**, Investigador Parga Pondal de la Universidade da Coruña y D. **Roberto SANTAMARÍA**, catedrático de Edafología de la Universidad Nacional del Sur en Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires, Argentina

CERTIFICAN:

Que la presente memoria titulada "**Ampliación del perfil de suelos erosionados y compactados mediante subsolado con enmienda cálcica profunda**" que para optar al grado de Doctor por la Universidade da Coruña presenta D. **Rodolfo MON**, ha sido realizada en el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Castelar, Buenos Aires, Argentina y en la Facultad de Ciencias de la Universidade da Coruña (UDC), España.

Considerando que constituye trabajo de *Tesis Doctoral*, autorizamos su presentación en el Instituto Universitario de Xeoloxía de la Universidade da Coruña.

Y para que así conste, expedimos el presente certificado en La Coruña, a 14 de marzo de 2008.

Fdo.: Antonio Paz González

Fdo.: Marcos Lado Liñares

Fdo.: Roberto Santamaría

AGRADECIMIENTOS

A los directores de mi tesis doctoral, por brindar su apoyo incondicional en todo el trabajo y su especial manera de alentarme.

A mi amigo y compañero de trabajo, Ms. Sc. Ing. Agr. Carlos Bernardino Irurtia, por su disposición permanente para atender mis dudas y su participación en los diversos trabajos de campo.

A mi esposa María Cristina por su apoyo moral y su entusiasmo inagotable infundido en todo momento y principalmente en los momentos más difíciles.

A mis hijos, Martín Javier, Gonzalo, María Eugenia, Juan Ignacio y María Laura, por sentirse orgullosos de este logro obtenido luego de muchos años de trabajo.

A mi madre, que con su sabiduría e inteligencia, supo apoyarnos en momentos difíciles.

A mi jefe y amigo, el Ing. Roberto R. Casas, que con su firmeza y su estima, me ayudó a superar mis propios límites.

A Juan Carlos Gualtieri, por la confianza depositada en nuestra propuesta desarrollando el prototipo de subsolador requerido para este trabajo con gran interés y generosidad.

Al Ing. Agr. Néstor Padullés por su iniciativa en ensayar la técnica propuesta, adelantándose a los primeros resultados del trabajo.

Al Ing. Agr. Néstor Trentino por su apoyo en la instalación y conducción de los ensayos en las áreas de la serie Los Cardos.

Al Ing. Agr. Néstor Carranza por su colaboración en la provisión de yeso granulado, con lo que se pudo iniciar estos ensayos en las diversas áreas.

A la Lic. Laura I. Giménez por su colaboración en el desarrollo de la redacción del trabajo y en el análisis estadístico de los datos extraídos de los ensayos de campo.

A los Ingenieros Agrónomos Hugo Conti y Ricardo Moschini, por la síntesis climática elaborada particularmente para las áreas de Arroyo Dulce en Buenos Aires y de Las Rosas en Santa Fe.

Al personal de laboratorio del Instituto de Suelos mi agradecimiento y en especial a los Técnicos Mirta Alassia y Tomás Piroló.

ÍNDICE

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- Subregión Pampa Ondulada	2
1.1.1.- Localización e importancia	2
1.1.2.- Clima	2
1.1.2.1.- Régimen térmico	4
1.1.2.2.- Régimen hídrico	7
1.1.3.- Geología	12
1.1.4.- Suelos	12
1.2.- Uso y Manejo del Suelo en la Pampa Ondulada	14
1.2.1.- Sistemas de cultivo y rotaciones a lo largo de la historia .	14
1.2.2.- Efecto de la Siembra Directa sobre los suelos	15
1.2.3.- Aplicación de enmiendas de yeso y cal	25
1.2.4.- Efecto del riego suplementario sobre los suelos	30
2.- OBJETIVOS	33
3.- MATERIALES Y MÉTODOS	35
3.1.- Descripción de los ensayos	36
3.1.1.- Suelo Serie Arroyo Dulce	38
3.1.2.- Suelo Serie Los Cardos	40
3.2.- Desarrollo del descompactador con distribuidor de yeso	43
3.3.- Propiedades generales del suelo	46

3.3.1.- Textura	46
3.3.2.- Mineralogía: Difracción de Rayos X	47
3.3.3.- Análisis químicos	48
3.3.3.1.- pH en agua	48
3.3.3.2.- Conductividad eléctrica	49
3.3.3.3.- Contenido de carbono orgánico.....	49
3.3.3.4.- Capacidad de intercambio catiónico	49
3.3.3.5.- Fósforo Bray	50
3.3.3.6.- Fluorescencia de Rayos X	51
3.3.4.- Análisis físicos	53
3.3.4.1.- Densidad aparente	53
3.3.4.2.- Porosidad total	54
3.3.4.3.- Porosimetría por intrusión de mercurio	54
3.3.4.4.- Superficie específica	55
3.3.4.5.- Constantes hídricas	59
3.3.4.6.- Contenido de humedad gravimétrica (%)	59
3.3.4.7.- Resistencia a penetración	60
3.3.4.8.- Ensayos de compactación en laboratorio	61
3.3.4.9.- Infiltración	62
3.3.4.10.- Estabilidad estructural	63
3.3.4.11.- Perfil cultural	64
3.4.- Rendimiento	69
3.5.- Métodos estadísticos: módulo SAS	70

4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
4.1.- Serie Arroyo Dulce: primer ensayo en El Alba, Salto	72
4.1.1.- Textura	73
4.1.2.- Mineralogía de las arcillas	74
4.1.3.- Propiedades químicas.....	76
4.1.4.- Propiedades físicas	81
4.1.4.1.- Primer muestreo	81
4.1.4.2.- Segundo muestreo	88
4.1.5.- Rendimientos	91
4.2.- Serie Arroyo Dulce: segundo ensayo en El Alba, Salto	93
4.2.1.- Propiedades físicas	94
4.2.2.- Rendimientos	101
4.3.- Serie Los Cardos: ensayo en La Peti, Bouquet	103
4.3.1.- Textura	104
4.3.2.- Mineralogía de las arcillas	105
4.3.3.- Propiedades químicas	107
4.3.3.1.- Primer muestreo	107
4.3.3.2.- Segundo muestreo	110
4.3.4.- Propiedades físicas	114
4.3.4.1.- Primer muestreo.....	114
4.3.4.2.- Segundo muestreo.....	116
4.3.5.- Perfil Cultural	125
4.3.6.- Rendimiento	129
4.4.- Serie Los Cardos: ensayo en campo Pavoni, Las Rosas	133

4.4.1.- Primer muestreo	134
4.4.2.- Segundo muestreo	135
4.4.3.- Perfil cultural	139
5.- CONCLUSIONES	143
6.- BIBLIOGRAFÍA	147

INTRODUCCIÓN

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Subregión Pampa Ondulada

En la región agrícola del norte de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba, los suelos son Argiudoles típicos con horizonte B textural bien desarrollado. Esta región llamada Pampa Ondulada con pendientes de 2-3%, tiene suelos franco limosos, con contenidos de limo de 60-70% hasta 30 cm de profundidad, donde comienza el horizonte B textural franco arcillo limoso, con 60% de limo y 38% de arcilla.

1.1.1.- Localización e importancia

La Pampa Ondulada constituye una unidad fisiográfica, comprendida entre el curso de los ríos Paraná-Plata y el Salado de Buenos Aires. Se caracteriza por el relieve predominantemente ondulado, recortado por cañadas, arroyos y ríos, que le dan una red de avenamiento bien definida.

1.1.2.- Clima

La caracterización climática del área estudiada ha sido llevada a cabo por Moschini et al., 2006. A continuación se presenta una síntesis de la misma.

La Pampa Ondulada tiene un clima templado, subhúmedo (lluvia anual ≈ 1000 mm). Las temperaturas de invierno difícilmente se sitúan por debajo de 0°C.

Los principales factores determinantes del clima de la región pampeana, dentro de la cual se encuentran los sitios analizados, son latitud, relieve poco desarrollado, proximidad al océano y a la cuenca del Plata, baja relación de

masa continental/oceánica y circulación general de la atmósfera (Burgos, 1969).

La región pampeana es afectada frecuentemente por masas de aire que se desplazan en la dirección SO-NE. Flujos de aire cálido y húmedo de rumbo N y NE son generados por la actividad del sector Occidental, del centro anticiclónico semipermanente del océano Atlántico (40° S), mientras que aire frío y seco del cuadrante S-SO se origina por la actividad del centro de alta presión del Pacífico, complementado por la circulación del oeste.

Durante los meses estivales, el calentamiento del continente, permite el desarrollo de un sistema de baja presión sobre el centro y NO de Argentina, el cual intensifica la actividad del anticiclón del Atlántico Sur. La inestabilidad atmosférica resultante, es la causa del modelo de tendencia monzónica del régimen de precipitación de la región.

En los meses invernales, el área de baja presión continental es reemplazado por centros de alta presión. El desplazamiento de la baja subantártica hacia el norte y el desarrollo de un anticiclón continental, producen un incremento en la frecuencia de pasaje de masas de aire frío desde el S, SO y O, proceso esporádicamente interrumpido por avances de aire cálido del N.

De esta forma, durante todo el año, las condiciones son apropiadas para la génesis de frentes (predominantemente fríos), situación que origina lluvias frontales, por lo común intensas y de alta erosividad en la primavera-verano (Hall et al., 1992).

Para la caracterización climática de la zona en estudio, en la que se hallan las localidades de Salto y Las Rosas, se utilizó información diaria de temperatura y precipitación de la serie 1970-1997, correspondiente a estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Instituto

Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), ubicada dentro del área en estudio y en su entorno.

1.1.2.1.- Régimen Térmico

Temperatura del aire

A partir del valor promedio de las temperaturas máxima y mínima diarias, se calcula la temperatura media anual, cuyas isotermas se observan en la Figura 1. Regionalmente la temperatura media anual se incrementa gradualmente en dirección Sur-Norte.

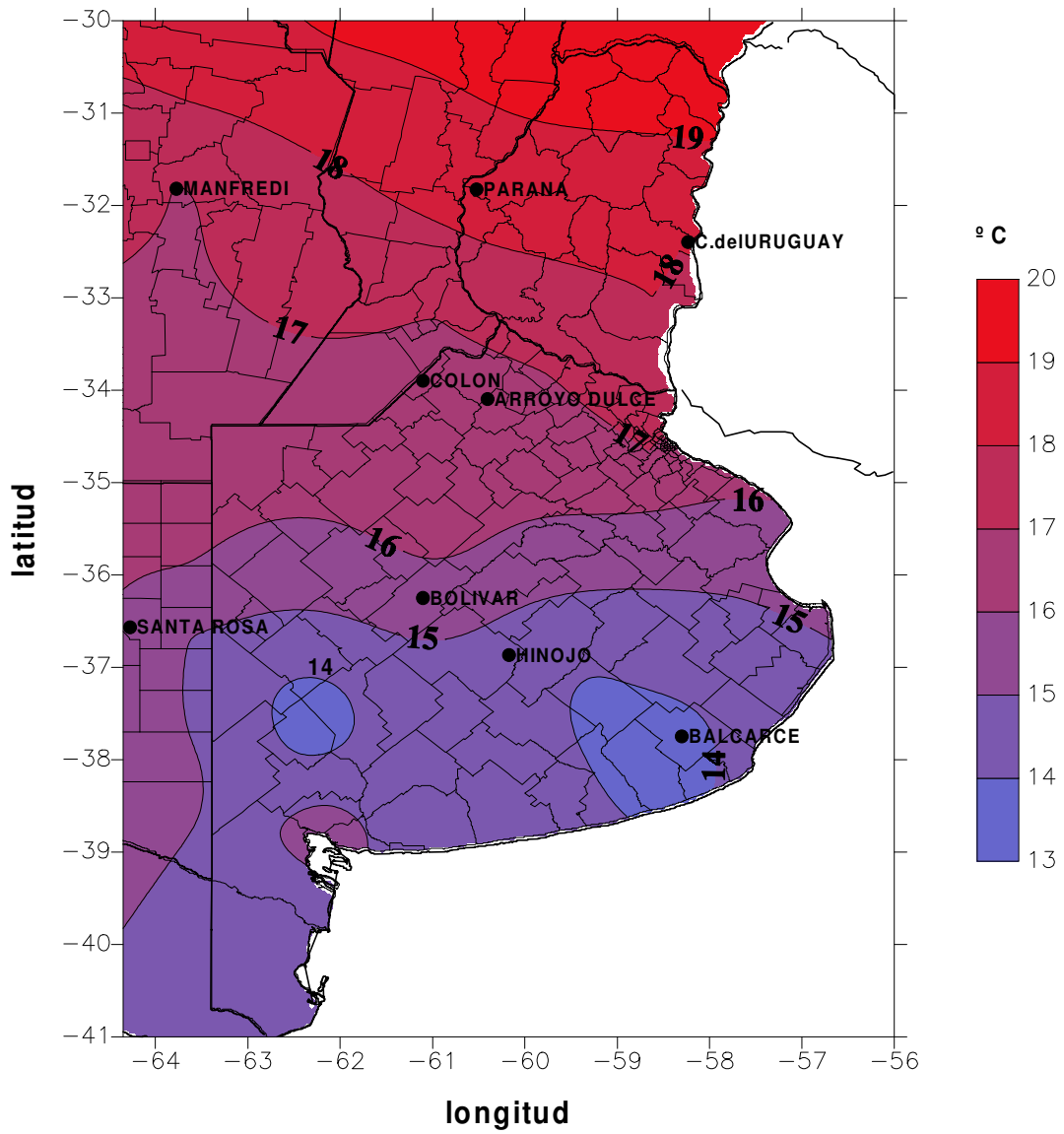
El sector posee un valor muy próximo a los 17° C (Figura 1). Por este elemento climático, de acuerdo a la clasificación de FAO (1981), el clima se define como templado cálido. El mes de julio, como en toda la región pampeana, es el más frío del año, mientras que en enero se observa el máximo valor de temperatura media mensual.

Heladas

La helada se define como el descenso de la temperatura a valores iguales o inferiores a 0° C. La ocurrencia de este fenómeno representa una de las adversidades climáticas de efecto más perjudicial para la vida vegetal en general, siendo las más peligrosas las que ocurren cuando las plantas están en plena actividad.

De acuerdo a la Figura 2, que representa la frecuencia media anual de días con heladas, el número medio para estas localidades oscila alrededor de los 15 días.

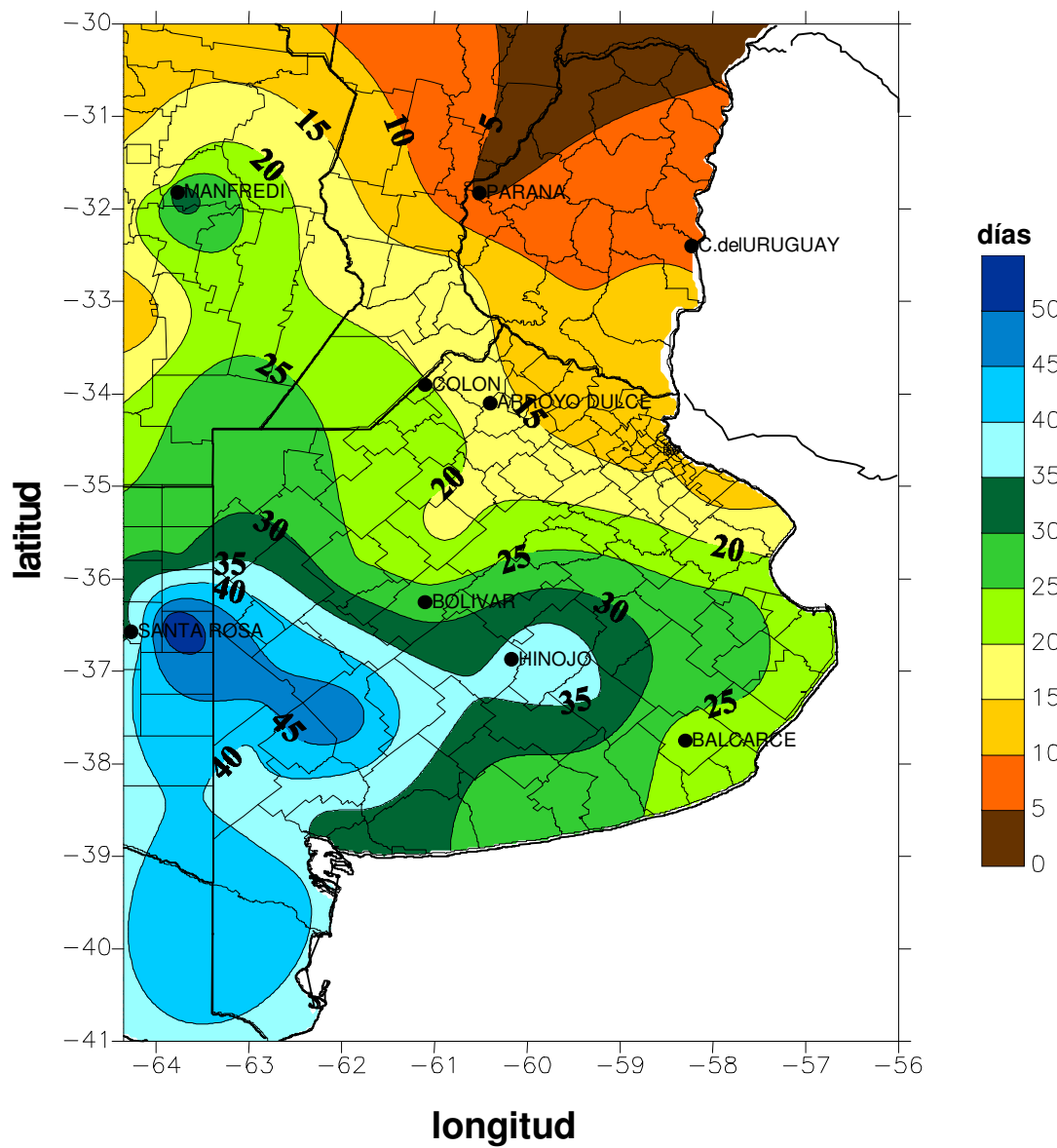
Figura 1. Temperatura media anual.



Fuente: INTA-SMN
Serie: 1971-1997



Figura 2. Número medio de días con heladas.



1.1.2.2.- Régimen hídrico

Precipitación

La distribución de la precipitación media anual en la región se puede observar en la Figura 3. Las lluvias medias anuales muestran una tendencia de disminución del este al oeste. En Salto el valor es de unos 1000 mm anuales y en Las Rosas de unos 900 mm anuales.

Una característica a mencionar es que en la dirección SE-NO el régimen pluviométrico incrementa su tendencia al régimen monzónico o sea con concentración de las lluvias en el verano.

Balance hídrico

Para describir el régimen hídrico de un sitio no es suficiente conocer la información pluviométrica, sino que también es necesario determinar si los aportes hídricos por lluvia y los consumos de agua o pérdidas a través del suelo y vegetales, satisfacen las demandas de los cultivos. Este proceso está representado por la Evapotranspiración potencial (ETP) y la real (ETR). Las relaciones entre ambas se establecen a través del Balance Hídrico, calculado por el método de Thornthwaite. Esta metodología se implementó para las estaciones representativas de la región. Se utilizó la tabla de retención de humedad del suelo para 300 mm de almacenaje y la serie de temperatura y precipitación 1970-1997, ya mencionada. Derivados de los balances, en las Figuras 4 y 5 se observa la distribución espacial de los excesos y deficiencias hídricas anuales. Los valores de exceso van desde unos 200 mm en Salto a unos 100 mm en Las Rosas. Las deficiencias de agua medias anuales, son casi insignificantes, alcanzando a unos 5 mm anuales. Se debe tener en cuenta, que estos son valores promedio y no significa, que no puedan existir años con deficiencias más o menos severas, al igual que otros años, con mayores o menores excesos hídricos. El área presenta esa mínima deficiencia anual de unos 5 mm, en los meses estivales. En marzo, normalmente se inicia la recarga hídrica del perfil del suelo, hasta aparecer los excesos en invierno-primavera.

Figura 3. Precipitación media.

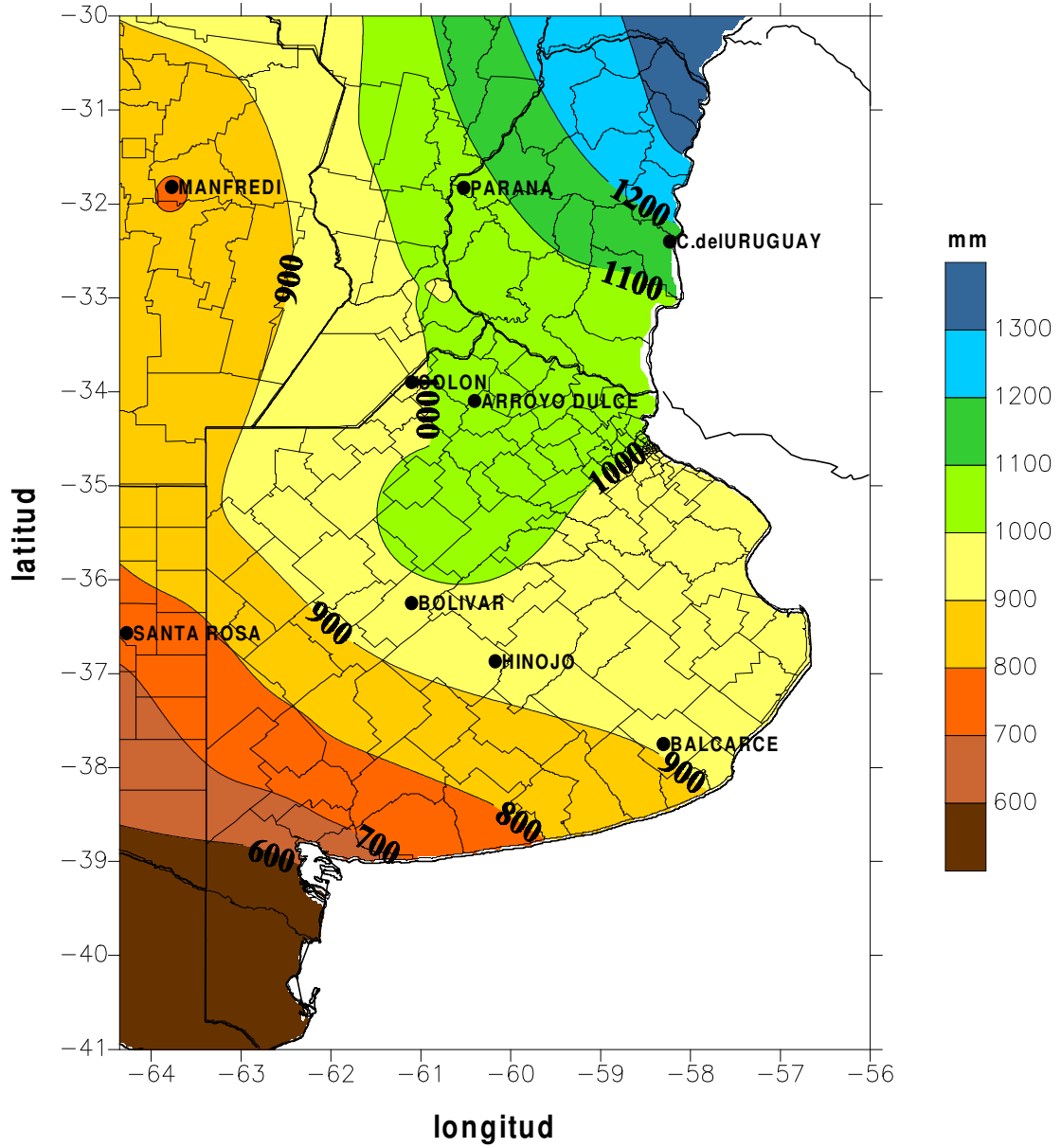


Figura 4. Exceso hídrico.

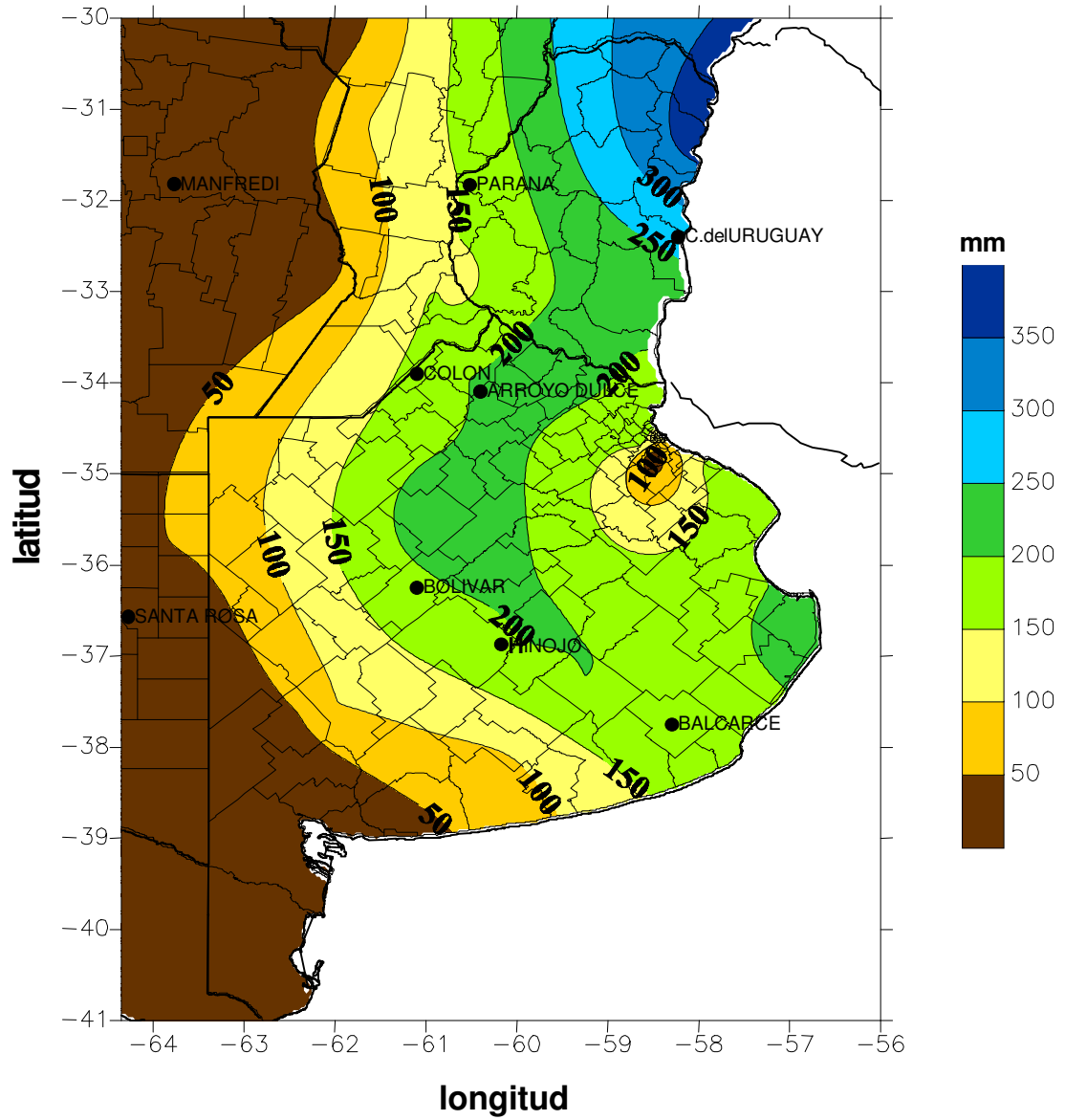


Figura 5. Deficiencia hídrica.

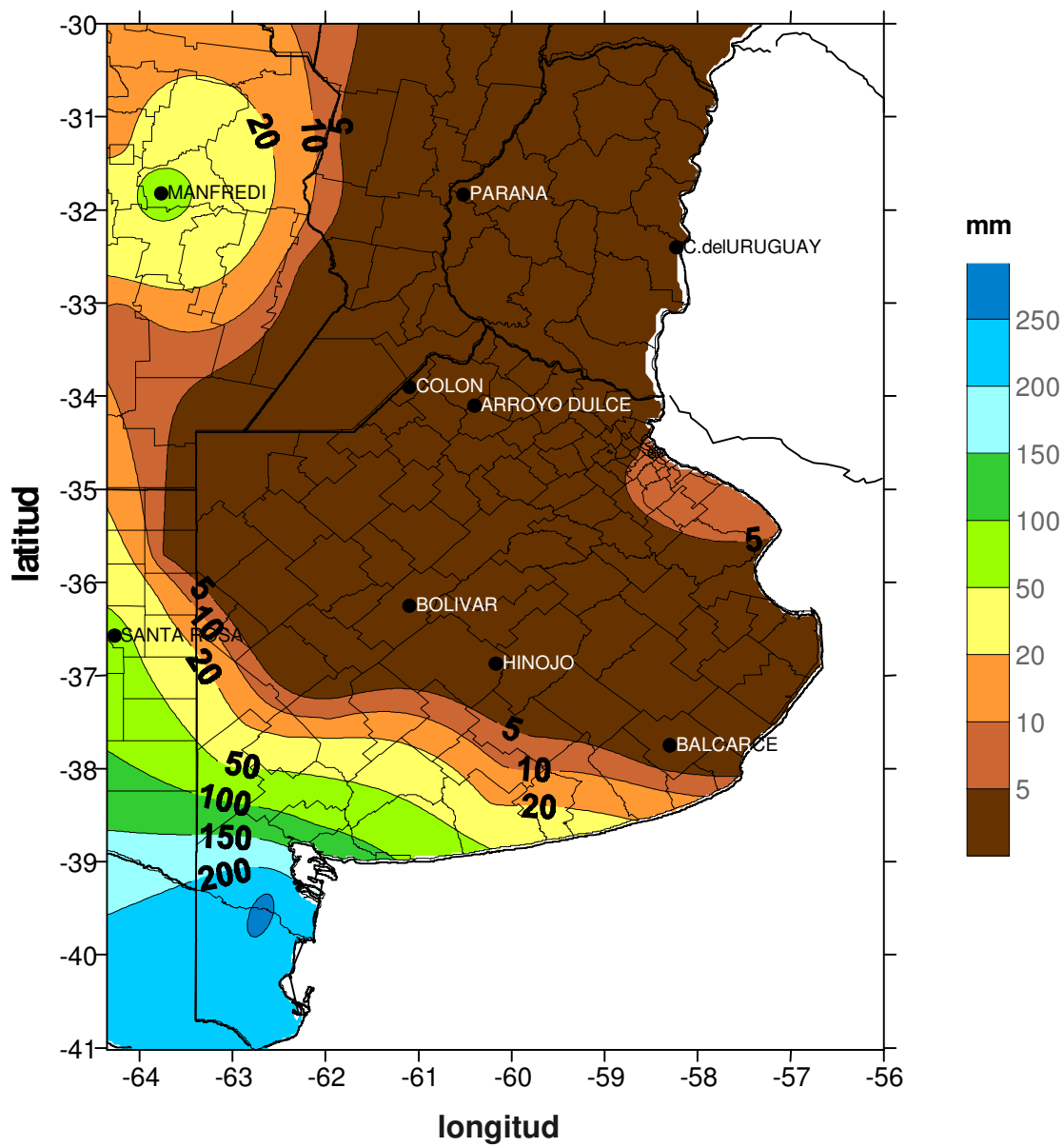
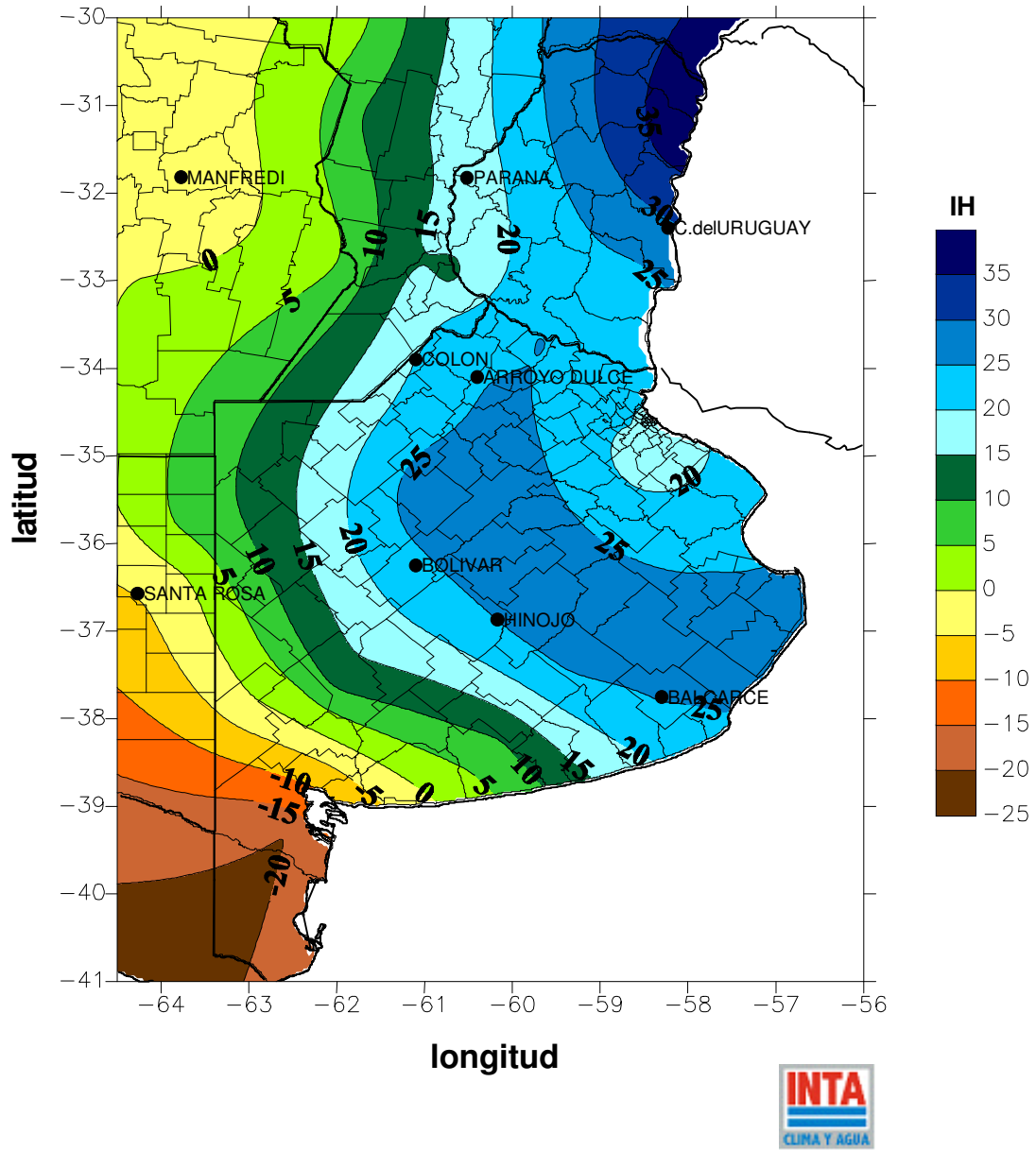


Figura 6. Índice hídrico.



El índice hídrico, calculado con los parámetros que surgen de los balances hídricos, permite realizar una clasificación del clima, estableciendo el régimen hídrico que le corresponde, para la zona. Tiene un valor medio cercano a 25 para Salto, correspondiéndole un Régimen Hídrico Subhúmedo húmedo y toma un valor de 10 aproximadamente en Las Rosas, con un Régimen Hídrico Subhúmedo Seco, como se aprecia en la figura 6.

1.1.3.- Geología

La Pampa Ondulada está caracterizada por un relieve formado por ondulaciones de escasa magnitud y en partes recortado por cañadas, arroyos y ríos. Este relieve se debe principalmente a un proceso de disección superficial originado por un ascenso diferencial más marcado que durante el Cuaternario y habría afectado a todos los bloques que componen su basamento cristalino profundo. Aparentemente estos bloques fueron afectados por un sistema de fracturas, con dirección principal NO-SE y NE-SO, reflejadas a veces en la superficie por el trazo de los principales cursos que la atraviesan.

Por su relieve esta región no tiene inconvenientes con el drenaje, posee una red de avenamiento bien definida y los materiales sobre los cuales se formaron los suelos son sedimentos loessicos de textura franco limosa. El relieve tiene pendientes que, en general, no alcanzan el 2%, salvo sectores de 3% y algunos interfluvios con lomas aplanadas de 0,5% de pendiente.

1.1.4.- Suelos

El área posee un suelo de textura fina, illítico, térmico Argiudol típico (Soil Taxonomy, USDA, 1975), Luvic Phaeozem (WRB, FAO, 2004). La textura del horizonte A es franco limosa con aproximadamente 23% de arcilla y 64% de limo.

En cuanto al uso del suelo hay que mencionar que es el área agrícola más importante de la región pampeana, que abarca el N de Buenos Aires, S de Santa Fe y SE de Córdoba, con un prolongado período de agricultura continua, con labranza convencional con arado de reja, donde actualmente se está difundiendo aceleradamente el sistema de siembra directa.

El elevado contenido de limo, asociado al bajo tenor de materia orgánica por la actividad agrícola intensa, hace que estos suelos sean muy susceptibles a formar capas endurecidas en forma subsuperficial, por migración y reacomodamiento de partículas finas.

La estructura del suelo es una de las propiedades físicas que más afecta la relación aire-agua-suelo, retención, movimiento del agua y relación infiltración-escurrimiento.

La infiltración del agua de lluvia en el suelo, es el proceso básico del que depende la agricultura de secano, proveyendo de agua a la zona radicular de los cultivos y evitando que se genere erosión por elevado escurrimiento, cuando se trata de tierras onduladas.

Además, la producción agrícola de la subregión Pampa Ondulada se ve limitada por el déficit de humedad en diversos períodos críticos de los cultivos tanto de verano como de invierno.

1.2.- Uso y Manejo del Suelo en la Pampa Ondulada

1.2.1.- Sistemas de cultivo y rotaciones a lo largo de la historia

El intenso uso agrícola a que se ha visto sujeta esta región, con arado de reja y rastras durante más de 80 años provocó en importantes sectores, que el horizonte superficial del suelo esté actualmente compuesto por materiales del horizonte B2t mezclados con materiales residuales del horizonte A, ya que el escurrimiento de la lluvia ha erosionado el horizonte superior, arrastrando 50 % o más de su espesor original. Este modo de laboreo convencional ha sido, en la Región Pampeana, el sistema tradicional para implantar los cultivos de cosecha y las pasturas, sistema que se basa en el paso repetido de la maquinaria, para crear una adecuada cama de siembra, donde implantar un cultivo.

En este sector del norte de la región pampeana, es decir, en la pampa ondulada, caracterizado por una distribución e intensidad de las lluvias irregular Irurtia y Mon, 2000, establecieron que en suelos erosionados, los horizontes arcillosos cercanos a la superficie son la causa de bajos rendimientos de los cultivos. Este carácter restrictivo se ejerce principalmente a través del inadecuado régimen hídrico resultante y la dificultosa penetración de raíces en tales horizontes (Orellana 1989).

Las labranzas con arado de reja y vertedera y las labores secundarias de rastreado, que son generalmente de discos, agreden a los agregados del suelo. En este proceso los agregados son desintegrados, no fracturados y reconstituídos por las líneas naturales de clivaje, como podría ocurrir en procesos naturales (Baker et al., 1996).

Actualmente, la región está afectada por procesos de degradación y erosión de suelos en diferentes grados, por esto es frecuente encontrar tanto degradación química como física. Los procesos de degradación química más importantes son

la pérdida de materia orgánica y de nutrientes (nitrógeno, fósforo, calcio y azufre). Son destacables los frecuentes procesos de acidificación; recientemente también se ha encontrado respuesta favorable a la fertilización con azufre (Martínez y Cordone, 2000).

La labranza continua degrada la estructura causando la compactación del suelo y el desarrollo de pisos de arado. A medida que aumenta la carga aplicada al suelo, comienza el colapso de los poros mayores y los agregados tienden a aproximarse entre sí, estableciendo nuevas zonas de contacto (Braunack y Dexter, 1979).

Desarrollos recientes de maquinaria, herbicidas y manejo han permitido establecer la labranza cero como un sistema alternativo viable de agricultura, siempre que se cuente con buenas condiciones de suelo inicialmente. La agricultura continua con el sistema de labranza convencional, en suelos susceptibles a compactarse, degrada la estructura. Esto ha venido ocurriendo en la Pampa Ondulada por más de 80 años y es en los últimos 20 años que irrumpió el sistema de siembra directa y se dejó el arado y las rastras de disco.

1.2.2.- Efecto de la Siembra Directa sobre los suelos

Según Porta et al, 2003, estructura es el ordenamiento de los granos individuales en partículas secundarias o agregados y el espacio de huecos que llevan asociados, todo ello como resultado de interacciones físico-químicas entre las arcillas y los grupos funcionales de materia orgánica.

La fuerza necesaria para compactar el suelo, disminuye exponencialmente a medida que aumenta el contenido de humedad (Baver, 1991). A determinado contenido de humedad, la densidad aumenta exponencialmente al aumentar la fuerza aplicada. La compactación excesiva puede limitar la absorción de nutrientes, la infiltración y redistribución del agua, el intercambio gaseoso y el desarrollo del sistema radicular.

De acuerdo con Lattanzi, 1997, la siembra directa contribuye a aumentar la producción en el mediano y largo plazo. Permite poner en producción suelos con alto riesgo de erosión y limitaciones en la disponibilidad de agua, permitiendo ampliar el área de cultivo. Es una solución para la mayoría de los problemas de erosión, con alguna práctica complementaria de conservación de suelos cuando se debe manejar excesos de escurrimiento superficial. Las condiciones físicas de agregación y porosidad mejoran, contribuyendo a aumentar la infiltración del agua y favorecer la actividad microbiana.

Baker et al., 1996, encontraron sistemas radiculares menos desarrollados y el cultivo con menos vigor y producción, en suelos en condiciones adversas con labranza cero comparado con cultivos implantados con labranza convencional. Es decir, en suelos donde la estructura ha sido degradada por agricultura continua durante un largo período, la siembra directa puede ser menos productiva que la labranza convencional. En esta situación sería conveniente realizar un mejoramiento de la estructura, hasta que los procesos naturales de regeneración de la misma puedan actuar. Estos procesos son promovidos por la siembra directa (SD) pero el problema es la fase de transición desde la labranza convencional a la SD, cuando se comienza de una situación con el suelo degradado estructuralmente.

En la región de la Pampa Ondulada considerada para este trabajo las explotaciones agrícolas están aumentando la superficie, por lo que los agricultores necesitan usar equipos agrícolas más grandes para realizar las tareas a tiempo.

En esta región, se observa que en el momento de la cosecha de los cultivos de verano, normalmente comienzan las lluvias de otoño, con lo que el suelo está con elevado contenido de humedad. Las cosechadoras y los acoplados graneleros dejan huellas muy marcadas en los campos cosechados, donde luego se observa una alta resistencia a penetración cuando se secan.

En la Tabla 1 se presentan las características de la maquinaria agrícola de una empresa contratista de trabajos agrícolas de Arroyo Dulce (BsAs).

Tabla 1. Efecto de la maquinaria agrícola en la compactación del suelo, presión específica y superficie afectada.

Labor	Nº	Ancho labor	Nº, disposición, ancho y diámetro de ruedas	Peso Cargado	Peso descargado	Presión neumát.	Longitud Contacto
Sembradora	1	4 m	DD 31 cm d: 0,80 m TT 31 cm d: 0,80 m	9000 kg	5000 kg	40 libras 2,81 kg/cm ²	30 cm
Pulverizadora	2-	21 m	OO 29 cm d: 1,40 m	4800 kg	1800 kg	30 libras 2,10 kg/cm ²	35 cm
Cosecha	1	7 m	DD 70 cm d: 1,74 m TT 37 cm d: 1,20 m	12500 kg	9500 kg	29 libras 2,03 kg/cm ²	50 cm
Carro granelero	2	--	OO 56 cm d:1,80 m	15600 kg	2600 kg	32 libras 2,25 kg/cm ²	50 cm
Tractor Sembradora	1	4 m	DD 52 cm d:1,53 m TT 52 cm d:1,53 m	6000 kg	6000 kg	15 libras 1,05 kg/cm ²	25 cm
Tractor pulverizadora	2-3	21 m	DD 13 cm d: 0,72 m TT 33 cm d: 1,47 m	4500 kg	4500 kg	30 libras 2,10kg/cm ²	25 cm
Tractor Carro	2	--	DD 22 cm d:0,82 m TT 40 cm d:1,67 m	5500 kg	---	29 libras 2,03 kg/cm ²	30 cm 33 cm

DD: ancho ruedas delanteras TT: ancho ruedas traseras OO: ancho ruedas centrales
d: diámetro rueda

El porcentaje de suelo con huellas suele ser de hasta 45% de la superficie de los lotes (Tabla 2).

Tabla 2. Área afectada y presión específica sobre el suelo, calculados a partir de los datos de la Tabla 1.

Labor	Superficie afectada (m ² /ha)	Porcentaje de área afectada (%)	Presión sobre el suelo (kg/cm ²)	Presión de neumáticos (kg/cm ²)
Sembradora	1550	15,5	2,4	2,8
Pulverizadora (3 pasadas)	817,8	8,17	2,3	2,10
Cosechadora	2000	20	0,85	2,03
Carro Granelero (2 pasadas/ha)	224	2,24	2,78 máx.	2,25
Total	4591,8	45,9	2,08	2,29

El área degradada por compactación del suelo, está incrementándose debido al aumento de la carga de las ruedas de la maquinaria agrícola (Imeson et al., 2004).

Rollán et al., 2004, informaron que el efecto de la siembra directa en suelos limosos del centro-norte de Córdoba, en siete años, produjo el aumento de la densidad aparente y disminuyó la capacidad de retención de agua en el perfil hasta 20 cm de profundidad. Recomendaron tareas de descompactación y la rotación con gramíneas para mejorar la estructura.

Venialgo et al, 2004, comparando labranza convencional con siembra directa, encontraron que en tres años aumentó la densidad aparente significativamente en este sistema.

El mayor conocimiento de los problemas asociados con la compactación del suelo ha difundido el interés por el subsolado. Esta técnica ha sido informada como beneficiosa de las propiedades físicas del suelo (Swain, 1975). La duración de los beneficios de la descompactación con subsolado es variable, comúnmente 3-4 años (Twomlow et al., 1994) y hasta 5-6 años (Fukunaka, 1980).

Greenwood y Cameron, 1990, han recomendado la necesidad de descompactar en profundidad para mejorar el comportamiento de cultivos y pasturas en siembra directa. Esto es especialmente aplicable a suelos de textura fina sometidos a agricultura continua.

A su vez Unger, 1993, considera que los suelos con un horizonte argílico espeso, con un límite superior abrupto, como los suelos considerados en el presente trabajo, debieran ser descompactados periódicamente, ya que dicho horizonte tiene baja permeabilidad y ofrece una limitación a la penetración de las raíces de los cultivos. La descompactación debe hacerse con implementos que no modifiquen la cobertura superficial, como el paratill.

Sin embargo en numerosos trabajos se comprobó que los efectos del subsolado son de corta duración, solo por una estación de cultivo (Busscher et al., 2000).

Los suelos con la estructura degradada son muy susceptibles a una pronta reconsolidación natural, desapareciendo rápidamente el efecto del subsolado. La experiencia se condujo en una pastura donde la estructura del suelo estaba degradada por un período previo de labranza convencional, lo que provocó que hubiera drenaje imperfecto. La rotación de cultivos se continuó con el sistema de siembra directa. Una vez subsolado el suelo se recompactó fácilmente.

Blackwell et al., 1989, indican que dos pasadas de tractor en la zona subsolada, hará que se retorne al estado anterior de compactación. Si se controla el tránsito de maquinaria se podrá prolongar el beneficio del subsolado.

Con la incorporación de la siembra directa en la Pampa Ondulada, era esperable que mejorara el control del escurrimiento, factor principal de la erosión hídrica en las áreas con pendiente. Pero rápidamente se observó que con la cobertura provista por este sistema, lo que se pudo controlar fue la pérdida de suelo. Por el contrario, sigue habiendo una pérdida importante del agua de lluvia por escurrimiento superficial, a causa de la compactación superficial producida por la agricultura continua, porque ya existe una degradación de la estructura del suelo muy importante.

La Argentina está entre los países con la mayor área agrícola con el sistema de siembra directa (SD). La SD fue adoptada en la Pampa Ondulada, en la que el paisaje ondulado favorece la pérdida de suelo y agua.

La SD abre un surco de aproximadamente 0,05 m para depositar allí la semilla del cultivo, y las malezas son controladas químicamente con Glifosato 46%, manteniendo intacta el resto de la superficie del suelo.

Sasal et al., 2006, encontraron en numerosos estudios que los suelos en siembra directa tienen una mayor tasa de infiltración, mayor capacidad de retención de agua y por lo tanto disminuyen las pérdidas por escurrimiento, comparando con suelos con labranza convencional. Esto se debería al

incremento de la estabilidad de agregados, ligado a la creación de bioporos verticales originados por raíces, lombrices y gusanos blancos. Los mismos son más efectivos para el movimiento del agua, el aire y el crecimiento de las raíces. Son menos tortuosos, más continuos y más estables que los producidos por las labranzas. Además la SD disminuye la frecuencia del tránsito de maquinaria, y el colchón de rastrojo superficial restringe el impacto de las ruedas en el suelo. Sin embargo algunos de los resultados de la siembra directa en la Pampa Ondulada contradicen la teoría general. En realidad se midieron tasas de infiltración menores en siembra directa que en labranza convencional y que en labranza vertical con cincel.

Además se ha puesto de manifiesto que el manejo con SD tuvo poco efecto en el aumento de la macroporosidad del suelo superficial, por razones genéticas del mismo. La entrada de agua al perfil en SD esta condicionada por la orientación de los poros. La disposición horizontal de los mismos en la superficie produjo una reducción significativa de la entrada de agua. Se detectó estructura laminar superficial en SD en una secuencia de cultivos con alta proporción de soja. La prevención de su formación será útil para contribuir al desarrollo de un agro-ecosistema sostenible bajo SD continua.

El arado de reja y vertedera que se utilizó en labranza convencional en la Pampa Ondulada, es el que produjo la mezcla del horizonte B2t con el A, pasando a constituir el horizonte superficial, en suelos inclinados, por lo tanto erosionados. Por ello estos suelos son menos productivos que los normales de la región y tienen un comportamiento hidrológico diferente al original, con menor capacidad de retención hídrica, menor tasa de infiltración de lluvia, menor permeabilidad al agua y al oxígeno, por su alto contenido de arcilla, bajo tenor de nutrientes y materia orgánica, respecto de los suelos no erosionados.

El horizonte B2t posee propiedades físicas desfavorables por su baja proporción de macroporos y una elevada resistencia mecánica que afecta marcadamente el crecimiento de las raíces de los cultivos. Todas estas características se ponen

más en evidencia a medida que este material queda más cerca de la superficie, que ocurre por avance de la erosión hídrica.

El horizonte A generalmente de 0-25 cm, no erosionado, tiene un contenido de limo de 55 a 65%, entre 2-50 micrones, por lo que son susceptibles a compactarse cuando tienen bajo contenido de materia orgánica. En las tierras planas de la región agrícola el material del suelo se ha ido estratificando por textura, sumado a su alto contenido de limo original y con el intenso uso agrícola han perdido gran parte de la materia orgánica. En consecuencia, estos terrenos son muy susceptibles a compactarse, siendo este proceso difícilmente reversible.

El avance en investigación de compactación del subsuelo es lenta. Mientras tanto, las industrias aumentan el peso de las máquinas. El proceso inducido por la presión de la rueda y la reacción de suelos no saturados frente a cargas instantáneas no está bien entendido. La influencia de la compactación se comprende con cargas estáticas pero los resultados de cargas dinámicas pueden ser mayores o menores que los de fuerzas estáticas.

La carga de las ruedas aumentó de 50 kN a las actuales de 130 kN. El máximo admisible es 40 kPa en húmedo y hasta 200 kPa en suelo seco en verano. Los macroporos, con un diámetro mínimo de 50 micrones, son autovías del aire y agua en el suelo. Su continuidad asegura la calidad física y biológica del suelo. Estos son los más vulnerables a la compactación. La compactación es considerada como una forma oculta de degradación del suelo.

La compactación superficial es más fácilmente controlable; en cambio, la compactación en el subsuelo arcilloso es mucho más persistente. Su recuperación biológica es muy lenta o no existe. El aflojamiento artificial es difícil. En años sucesivos la recompactación es común y, como consecuencia, las propiedades físicas como la conductividad del agua y de los gases se reducen fuertemente hasta 1/10 ó 1/100 de los valores originales. Es mejor

prevenir la degradación de la estructura del suelo que recuperarla posteriormente.

La prevención puede efectuarse con ruedas grandes de baja presión en máquinas bien diseñadas y sistemas de labranza reducida o con tránsito reducido a carriles fijos. Se debe trabajar el suelo en los momentos que haya un tenor de humedad adecuado. Además hay que tener en cuenta la carga. Así, una rueda con 200 kPa de inflado y 30 kN de carga daña más que una rueda de 80 kPa y 50 kN (Imeson et al., 2004).

Ingaramo, 2003, señala que los suelos con limo y arena fina o muy fina, que son partículas que no tienen cargas en superficie, dependen, sobre todo, del contenido de materia orgánica para que puedan formar agregados. El efecto beneficioso de la materia orgánica en las condiciones físicas del suelo para el crecimiento de las plantas, se debe a su influencia en la agregación estable al agua. La pérdida de la misma por el intenso uso agrícola, ha determinado que el escurrimiento de la lluvia haya erosionado el horizonte superior, arrastrando 50% o más de su espesor original, en la Pampa Ondulada, como ya se indicó anteriormente.

Para atenuar los efectos negativos del horizonte arcilloso se ha recurrido a técnicas mecánicas que producen su agrietamiento, como el subsolado (Puricelli y Legasa, 1973; Weir y Puricelli, 1978) o el uso de arado de desfonde, produciendo una mezcla de horizontes más profundos (Pilatti y Antille, 1985).

El impacto de ciclos de humectación y desecación en la organización estructural depende de la acción de éstos sobre la cohesión del suelo. La contracción durante el secado de los materiales cohesivos del suelo está determinado por el tipo de arcilla, la concentración de electrolito en el agua del suelo y la superficie específica (Low, 1980). La contracción de materiales cohesivos origina esfuerzos que a su vez son los responsables del comienzo de la formación de grietas, lo que ocurre cuando éstos superan la resistencia a la tracción.

Las grietas se desarrollan donde la resistencia es menor, lo que coincide con las zonas más húmedas del suelo. La formación de grietas supone una disminución de los espacios intra-agregados. Además la persistencia de grietas durante la rehumectación implica que la densidad aparente de los agregados es relativamente alta. Por ello los procesos de contracción-expansión modifican continuamente la distribución del tamaño de poro de las unidades estructurales del suelo (Guérif, 1994).

Como resultado de labranzas profundas a 0,4, 0,6 y 0,9 m con un subsolador Varsa et al., 1997 observaron el incremento de la densidad de raíces de maíz y el aumento de rendimiento, en un suelo franco limoso pobremente drenado, con una capa naturalmente compacta a 0,5 m de profundidad que dificultaba la infiltración profunda del agua de lluvia y el desarrollo de raíces. En estos suelos el efecto de descompactación se mantuvo por cuatro años sin enmiendas químicas adicionales.

Según Franzluebbers et al., 2002, el uso de siembra directa continua influye negativamente en el movimiento del agua y nutrientes al subsuelo, debido a la alta densificación del suelo. El subsolado puede ser una estrategia conservacionista, para descompactar superficial y subsuperficialmente sin que haya incorporación de residuos vegetales de la superficie. En este trabajo se inició un estudio a largo plazo en cuatro microcuencas con una historia agrícola de 10 años de siembra directa. Dos de estas cuencas fueron subsoladas todos los otoños y manejadas con labranza conservacionista, similar a la de las cuencas restantes. Se evaluaron las propiedades de la superficie del suelo, el primero y segundo año. La densidad aparente (DA) de 0-20 cm fue menor significativamente en subsolado $1,37 \text{ g/cm}^3$ que en siembra directa $1,51 \text{ g/cm}^3$. El carbono orgánico fue mayor en subsolado $10,4 \text{ mg/g}$ que en siembra directa $8,7 \text{ mg/g}$. Como el contenido de materia orgánica es de residuos y suelo hasta 20 cm, no hubo diferencias entre sistemas hasta ahora. Se concluye que en estos primeros años del estudio, el subsolado anual combinado con siembra

directa tiene poco impacto negativo en las propiedades químicas superficiales del suelo.

El efecto de subsolado con paratill en un suelo Paleustol con un horizonte argílico espeso, de drenaje lento y difícilmente penetrable por las raíces fue medido por Unger, 1993. La acción no afectó la cobertura superficial del cultivo realizado en siembra directa, mejorando la estructura del subsuelo. La profundidad de trabajo fue entre 25-30 cm y el ancho 1,45 m, con las láminas 0,8 m entre sí.

En los suelos de la Pampa Ondulada, las experiencias de subsolado muestran que el efecto en el horizonte B textural no persiste por mas de 2 años por el elevado contenido de arcillas expandibles (Puricelli y Legasa, 1973).

Farina y Channon, 1988, y Richards et al., 1995, diseñaron distintas metodologías para incorporar cal o yeso al subsuelo (primeros centímetros del horizonte B) simultáneamente y en la misma operación del descompactado (Deep-ripping/ Deep-loosening).

De estos antecedentes surgen los siguientes problemas a ser resueltos:

- Baja productividad de suelos erosionados por la pérdida del horizonte A e impedimentos físicos y químicos del horizonte B subyacente.
- Descenso de la fertilidad (nutrientes N-P-K-S) así como alta resistencia a la penetración del horizonte B que impide una buena exploración radicular.
- Disminución de la infiltración que genera altos escurrimientos, incrementos de la erosión hídrica y reducido almacenamiento para el desarrollo del cultivo.
- Reducción de la productividad en planteos de siembra directa como consecuencia de procesos de compactación.
- Mantenimiento de la productividad y sustentabilidad de planteos de agricultura continua en establecimientos de pequeños y medianos productores.

- Grado de homogeneidad de la difusión del producto en el perfil del suelo.
- Evaluación técnica y económica de los distintos sistemas de alimentación a ser empleados.
- Evaluación a campo de distintos sistemas de difusión. Grado de precisión alcanzado en la colocación en profundidad del insumo a emplearse en cuanto este debe de ser incorporado sin solución de continuidad desde la superficie del suelo hasta la profundidad de trabajo elegida.
- Evaluación técnico económica de otros métodos de incorporación alternativos a los que implican el empleo de la labranza vertical con ese fin.

1.2.3.- Aplicación de enmiendas de yeso y cal

Según Burns y Davies, 1986, los agentes responsables de la estabilidad de la estructura pueden ser de naturaleza orgánica o inorgánica y en general son los mismos que contribuyen a su génesis: contenido y naturaleza del humus y de la fracción de arcilla, la asociación de ambos coloides y la presencia de cationes de cambio bi- o tri-valentes, así como el tamaño de partículas de las fracciones de limo y arcilla.

Acudiendo a enmiendas químicas, en ensayos de laboratorio con dosis bajas de carbonato de calcio, sobre material del horizonte B textural con 49% de arcilla de un Argiudol ácuico Serie Humboldt (Orellana y Diez, 1988), lograron reducir la expansibilidad y consistencia.

Goss, 1991, indica que alrededor del 20% del carbono fijado por las plantas pasa al sistema de raíces y un quinto del mismo pasa directamente al suelo durante el crecimiento del cultivo; el resto contribuye a la materia orgánica del suelo cuando decae o muere. Esta actividad es la de mayor efecto en el suelo y promueve la estabilidad estructural y la disponibilidad de nutrientes. Actividades como la compresión y el corte del suelo durante la expansión de raíces afectan al suelo reduciendo la estabilidad de los agregados naturales.

Una metodología desarrollada para mejorar los rendimientos de algodón en tres suelos: franco limoso, franco arenoso y franco arcillo limoso (Mullins et al., 1997) donde había una compactación subsuperficial, fue eliminada con subsolado aplicando cal con potasio hasta 38 cm de profundidad con un distribuidor a tres niveles diferentes dentro de la hendidura. Hubo buena respuesta en rendimiento y el efecto se mantuvo por tres años.

Partiendo de la base que la aplicación de yeso incrementa la conductividad hidráulica en suelos con subsuelo arcilloso y la aplicación superficial no se había usado por el elevado volumen de yeso necesario, Jayawardane y Blackwell, 1986, desarrollaron un sistema de aplicación en hendiduras verticales angostas mezclando el yeso con el suelo, logrando aumento en los rendimientos de trigo.

Un subsolador con un distribuidor de calcáreo denominado "deep limer" (encalador profundo), desarrollado por Farina y Channon, 1988, permitió aplicar el material hasta 0,75 m de profundidad en la hendidura de 0,07 m de ancho, en cantidades hasta de 14 Mg/ha, distribuido desde 0,25 a 0,75 m del perfil.

Aplicando yeso en hendiduras de 0,15 m de ancho, hasta 0,8 m de profundidad con calcáreo, Jayawardane et al., 1995, en suelos limosos lograron la descompactación del 25% de la superficie solamente, con un incremento del desarrollo de raíces de alfalfa que aumentó el rendimiento en un 46%.

En suelos con un horizonte Bt arcilloso expuesto, la aplicación de enmienda de yeso superficial y luego incorporado con labranzas hasta 10 cm de profundidad, desarrollada por Greene y Wilson, 1984, incrementaba la conductividad hidráulica en el perfil, con valores significativos: de 0,15 a 0,85 cm/h. El principal efecto del yeso en estos suelos fue disminuir la dispersión de la arcilla por efecto electrolítico, que al evitar la obturación de los poros pequeños con partículas finas, permitía el incremento de la conductividad hidráulica.

En un suelo con subsuelo compacto y ácido en profundidad, que era un impedimento a la exploración de las raíces, Sumner et al., 1986, con aplicación profunda de yeso redujeron el aluminio soluble, aumentando el calcio soluble, reduciendo la resistencia a la penetración de raíces, facilitada por el agrietamiento del subsuelo compacto.

Con la utilización de enmiendas cálcicas como yeso o cloruro de calcio, en argiudoles erosionados de la cuenca del Río Carcarañá, Priano et al., 1986, modificaron la macroporosidad y la conductividad hidráulica del horizonte B textural, alterando las relaciones entre calcio, hierro y arcillas. Los incrementos de macroporosidad disminuyeron la amplitud de la expansión-contracción de las arcillas.

La aplicación de enmienda de yeso en superficie para incorporarlo al subsuelo por lixiviación, en un suelo con horizonte Bt arcilloso, impedimento para la penetración de raíces, mostró su efecto mediante la disminución de la resistencia a penetración, midiendo el índice de cono, Radcliffe et al., 1986. Las raíces proliferaron más en las parcelas cultivadas y con yeso, no así en parcelas con yeso pero en barbecho. Considerando la estabilidad de agregados, se encontró que entre 30 y 60 cm de profundidad, aumentó significativamente la proporción de agregados de 2,0 mm o mayores, a expensas de los menores de 0,25 mm, en parcelas de cultivo con yeso.

El subsolado de una capa compactada entre 10-20 cm de profundidad mejoró la disponibilidad de agua hasta 40 cm (Steed et al., 1987). El agregado de enmienda calcárea en profundidad mejoró la sortividad del suelo, capacidad de absorber agua hasta la saturación por efecto del potencial mátrico del suelo, y disminuyó la resistencia a la penetración, persistiendo este efecto por 30 meses. El incremento de productividad hizo que esta práctica fuera económicamente factible.

El subsolado con aplicación de yeso en siembra directa (Ellington, 1986), produjo una disminución marcada de la resistencia a la penetración, que se mantuvo durante los tres años del ensayo.

Con la aplicación de 4 Mg/ha de yeso mezclándolo en el suelo con un Bt compacto (Blackwell et al., 1989), lograron una baja recompactación en las hendiduras de 0.10 m de ancho y 0.40 m de profundidad a 0.60 m entre sí. Esto respondería a que el yeso mezclado con arcilla induce al fraccionamiento fino, formando agregados friables debido a la fuerza iónica del yeso disuelto y a la baja plasticidad de las partículas no disueltas (Alcordero y Rechcigl, 1993).

En un ensayo de labranza profunda con enmienda de 5 Mg/ha de yeso, en un suelo compacto de baja infiltración y elevada resistencia a la emergencia de plántulas (Hall et al., 1994a), encontraron una disminución significativa de la resistencia a penetración por debajo de los 5 cm de profundidad. El tratamiento con yeso nunca excedió los 2,5 Mpa de resistencia, valor limitante para la penetración de raíces, mientras que sin yeso se aproximó a 3 Mpa, por debajo de 0.15m. La aplicación de 5 Mg/ha de yeso produjo un aumento significativo de la conductividad hidráulica y del agua disponible para las plantas en el año de aplicación (Hall et al., 1994b).

Con un subsolador diseñado para hacer una descompactación profunda del suelo aplicando calcáreo a tres profundidades (Richards et al., 1995), lograron aplicar hasta 55 Mg/ha de calcáreo. Tuvieron dificultades en obtener una distribución uniforme a lo largo de los 0,75 m de profundidad de la aplicación, ya que se producía una concentración del calcáreo a la mayor profundidad. Esto se solucionaría haciendo una labor a menor profundidad 0,50 m, con lo que mejoraría la uniformidad de aplicación del calcáreo.

Encalado

Se estima que alrededor de 16 millones de hectárea están afectadas por procesos de acidificación. Esta zona está ubicada en el norte de Buenos Aires, centro y sur de Santa Fe, sudeste de Córdoba y noreste de La Pampa (Gambaudo, 2003). Los suelos son Argiudoles, con horizonte B textural, bien provistos de materia orgánica y nutrientes, levemente ácidos en superficie y moderadamente alcalinos en profundidad. Esta es una región con 950 mm anuales de precipitación, con un uso intensivo del suelo y elevada producción agrícola, en la que, además, en los últimos 20 años se incorporó el doble cultivo anual trigo-soja.

Existen varios factores que producen acidificación del suelo:

- Extracción de cationes por los cultivos: un suelo con una adecuada Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), con una buena saturación de bases debería tener 65% de Ca, 10% de Mg, 8% de K, 15 % de H y el resto Na, Fe, Mn, Cu y Zn. Los cultivos al absorber cationes liberan H^+ , que favorece la acidificación.
- El movimiento de cationes a horizontes subsuperficiales por lixiviación, acidifica el suelo.
- La descomposición de la materia orgánica, libera CO_2 , que se transforma en HCO_3^- acidificando.
- Uso de fertilizantes con NH_3 que, al transformarse en NO_3^- , provoca un exceso de H^+ .

El encalado es una práctica que corrige la acidez edáfica a través de la aplicación de productos capaces de neutralizarla.

Existen varios materiales capaces de reaccionar en el suelo y corregir la acidez. El carbonato de calcio, o cal, es el más utilizado. El efecto del encalado, en general, dura dos a tres años.

Rivero et al.,2001, determinaron que encalando un Argiudol en base al método buffer del mismo, en la Pampa Ondulada, al aumentar la dosis de caliza, aumentó el pH y disminuyó el tenor de Cu, Fe y Mn.

Gambaudo, 2003, en un ensayo con alfalfa en el sur de Córdoba logró disminuir la pérdida de plantas en 540 días desde implantación, de 40% a 25% de pérdida, y el porcentaje de saturación de bases aumentó de 51% en el testigo a 65% en el encalado.

1.2.4.- Efecto del riego suplementario sobre los suelos

En los últimos 10 años se ha difundido el riego suplementario exitosamente en la región pampeana, como una técnica efectiva para alcanzar altos niveles productivos y mantenerlos en el tiempo. Se aplica principalmente en los cultivos de maíz, soja y trigo, utilizando aguas subterráneas de variada calidad.

Desde los primeros años se cuestionó la conveniencia de esta práctica por las posibles implicancias negativas que podría tener el uso sostenido de las aguas subterráneas ricas en carbonato y bicarbonato de sodio, sobre el suelo.

Arens, 1969, consideró que el riego suplementario con agua freática bicarbonatada, no era aconsejable porque conduciría a la sodificación del suelo en aproximadamente 18 años. Como consecuencia de este proceso la materia orgánica y la arcilla del horizonte A se pondrían en movimiento casi desde el principio, tornándose el balance de materia orgánica cada vez más negativo. Con esto se planteaba un interrogante muy importante sobre la sustentabilidad de los sistemas productivos bajo riego suplementario.

Investigaciones posteriores realizadas por Cerana, 1980 y Génova, 1993, en campos con 3-5 años de riego suplementario mostraron resultados disímiles.

Cerana, 1980, encontró en un Haplustol éntico de Córdoba después de un cierto período de riego, un aumento del PSI de 1,3-2% a 4,5-7,4% y una reducción de la permeabilidad del orden del 46 al 85%, con manifiesta dispersión de coloides.

Por otra parte Génova, 1993, en suelos agrícolas del norte de Buenos Aires, no detectó impactos negativos que degraden el sistema agua-suelo-planta, a causa del uso de aguas de riego bicarbonatadas. Adjudicó tal resultado a un mecanismo natural de control que ocurriría en los suelos de la región pampeana. Este mecanismo requiere suelos profundos, bien drenados, sin napa freática cercana a la superficie y excelentemente provistos de calcio.

En 1998 Andriulo et al., encontraron en un lote de la EEA Pergamino con 11 años de riego suplementario, un notable aumento del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y del pH. El suelo es un Argiudol típico, cuyas características están muy difundidas en la región pampeana.

Peinemann et al., 1999, mediante el lavado de suelo en columnas, en laboratorio, con aguas subterráneas de diversa composición, estableció que en todos los casos estudiados se produjo algún grado de sodificación y sugirió analizar profundamente cada caso en particular antes de decidir la aplicación de riego suplementario.

Mon e Irurtia, 1998, en un sistema de riego suplementario, establecieron un ensayo de enmienda con Poliacrilamida (PAM), para mejorar la infiltración del agua de riego. Dicha agua además tenía elevado contenido de bicarbonato de sodio, por lo que después de varios años de riego, comenzó un proceso de sodificación, produciendo una dispersión de los coloides, que impidió la infiltración del agua de riego por aspersion. En dicho ensayo hubo un efecto positivo de la PAM, evitando el escurrimiento superficial.

Wallace et al, 2004, también con Poliacrilamida (PAM) consiguieron reducir el escurrimiento en un 90%, en un suelo arenoso, aplicando 20 kg/ha. Estos autores también evidenciaron un efecto positivo de la PAM.

OBJETIVOS

2.- OBJETIVOS

La combinación de una remoción profunda con un subsolador que simultáneamente aporte un reactivo químico como el yeso, podría producir una ampliación del perfil aprovechable por las raíces de los cultivos, en forma prolongada en el tiempo.

Teniendo en cuenta la anterior hipótesis, se llevaron a cabo ensayos de campo, complementados con medidas en laboratorio, siendo los principales objetivos de dicho trabajo los siguientes:

Aumentar la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo y lograr un mayor volumen del perfil explorado por las raíces por un lapso de tiempo que resulte factible económicamente.

Mejorar las propiedades físicas hasta 0,35 m, para facilitar la entrada del agua al perfil, mejorar la fertilidad con azufre y calcio, y con esto aumentar la producción.

Como consecuencia también aumentará la cantidad de residuos en superficie y disminuirá el escurrimiento con lo que habrá menor riesgo de erosión en las pendientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.- Descripción de los ensayos

Los ensayos se llevaron a cabo en suelos Argiudol típico, franco limosos del N. de Buenos Aires y del S. de Santa Fe, en pendiente, que han sufrido la pérdida del horizonte superficial o parte del mismo por erosión hídrica, con un prolongado período de agricultura continua y que actualmente están en el sistema de siembra directa.

Se seleccionaron lotes para ensayar la recuperación del espesor útil del suelo, mejorando la estructura del horizonte más explorado por las raíces de los cultivos.

Las parcelas se demarcaron en lotes en producción y se dejó el ensayo dentro del esquema del lote. Se hicieron los tratamientos y se mantuvieron señaladas las parcelas para el seguimiento, sin interferir el trabajo del productor.

La descompactación se realizó con el prototipo de subsolador desarrollado en este trabajo. Se hizo a 35-40 cm de profundidad, con el distribuidor de yeso granulado regulado para agregar desde la superficie hasta el fondo de la brecha producida por la hoja, 0,6 Mg/ha. Las hojas trabajaron a 0,7 m entre sí.

El ensayo tuvo los siguientes tratamientos, con tres repeticiones:

- **Descompactado + yeso:** a 0,35 m de profundidad con enmienda de yeso en la hendidura, aplicando 0,6 Mg/ha de yeso en bandas de 0,05 m de ancho separadas 0,70 m. Teniendo en cuenta la anchura y la profundidad de la hendidura en cada banda, la dosis total es de 7 Mg/ha.

El yeso, $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ con una pureza del 90%, usado fue granulado, de 2-3 mm de diámetro, lo que facilitó el funcionamiento del mecanismo distribuidor.

- **Descompactado:** a 0,35 m de profundidad, sin enmienda.

- **Testigo:** sin yeso y sin descompactación.

Los tratamientos se realizaron una vez, para monitorear su efecto en el tiempo. Los ensayos se evaluaron en momentos determinados del año: antes de la siembra del cultivo realizado por el productor y al final del ciclo del cultivo ya sea antes o después de la cosecha.

Se extrajeron muestras de las parcelas, para determinaciones químicas y físicas. Se determinaron profundidad y distribución de raíces hasta la profundidad tratada.

Basándose en la información recogida respecto de la realización de subsolado, acompañado de enmienda subsuperficial de yeso, en suelos degradados y erosionados, se trabajó en la descompactación del material arcilloso del Bt y se trató de mantener su agregación por efecto del yeso para prolongar el fraccionamiento de los agregados mayores, con el consiguiente incremento de la infiltración del agua y la penetración de raíces (Varsa et al., 1997; Franzluebbbers et al., 2002).

En nuestro caso, es decir, en la región de la Pampa Ondulada, la compactación se produce a los pocos años de iniciada la siembra directa (SD), en suelos con una historia de muchos años de agricultura continua con labranza convencional. Con textura franco limosa, muy susceptible a compactarse y sin autoestructuración, con bajo tenor de materia orgánica, hay una inmediata recompactación después del subsolado. Por esto se enmendó con yeso en profundidad, para promover la floculación de la arcilla en la zona de horizonte B fracturado por la hoja subsoladora y en los sitios decapitados por erosión hídrica, con el B a poca profundidad.

3.1.1.- Suelo Serie Arroyo Dulce

En el predio del ensayo de Salto, provincia de Buenos Aires, el suelo pertenece a la Serie Arroyo Dulce. El horizonte Ap de 30-35 cm de espesor es de textura franco limosa y estructura granular, color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo y posee un adecuado contenido de materia orgánica. El horizonte Bt es arcilloso y de color rojizo. Este suelo tiene pendiente de 2-3% y está erosionado, con la pérdida de 20 cm del horizonte A. Las labranzas han incorporado parte del B2t al horizonte superior.

Tabla 3. Propiedades generales de la serie Arroyo Dulce.

Horizonte	Ap	A12	A3	B1	B21t	B22t	B3	B3	C
Prof. muestra, cm	0-14	14-34	34-45	45-58	58-77	77-97	97-120	120-140	140-220
Materia orgánica, %	3,89	3,31	1,58	0,93	0,88	0,72	0,41	0,22	0,15
Carbono orgánico, %	2,26	1,92	0,92	0,54	0,51	0,42	0,24	0,13	0,09
Nitrógeno total, %	0,224	0,197	0,093	0,070	0,076	0,066	0,053	0,049	0,028
Relación C/N	10	10	10	8	7				
Arcilla, < 2 μ, %	20,6	24,6	26,8	32,4	39,8	39,4	26,1	23,2	19,3
Limo, 2-50 μ, %	63,9	62,6	57,9	53,2	48,2	46,6	53,5	54,7	59,4
Arena muy fina, 50-100 μ, %	10,9	11,1	14,6	12,5	10,1	12,9	18,3	19,2	17,9
Arena fina, 100-250 μ, %	3,4	1,3	0,7	1,8	1,8	1,0	1,9	2,5	2,4
Arena media, 250-500 μ, %	0,7	0,3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6
Arena gruesa, 500-1000 μ, %	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
Arena muy gruesa, 1-2 mm, %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Calcáreo, CaCO ₃ , %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Eq. humedad, %									
pH en pasta	5,4	5,3	5,6	5,6	5,5	5,7	5,7	5,8	6,2
pH en agua, 1:2,5	6,2	6,2	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	6,9	7,0
Cationes cambio, m.e./100 g									
Ca ⁺⁺	16,1	14,8	11,7	11,1	17,3	18,1	14,9	13,3	13,7
Mg ⁺⁺	2,2	2,4	2,8	3,8	5,5	6,2	4,3	4,2	4,2
Na ⁺	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	1,2	0,5	0,4	0,5
K ⁺	2,1	1,5	1,2	0,9	1,5	1,7	1,6	1,6	1,8
Acidez de intercambio	6,2	7,0	5,5	5,1	6,2	6,0	4,6	4,0	3,3
Suma de bases, m.e./100 g (S)	20,8	19,2	16,2	16,3	24,8	27,2	21,3	19,5	20,2
CIC, m.e./100 gr (T)	22,8	22,3	20,5	19,4	28,5	29,4	23,1	22,2	21,7
Saturación con bases, % (S/T)	91	86	79	84	87	92	92	88	93

El sector seleccionado es una franja entre dos terrazas, en un lote que está sistematizado con terrazas en contorno, con siembra directa de seis años de antigüedad.

En este sector, y para el espesor de 0-10 cm, el tenor en materia orgánica es del 3% y el fósforo de 10 ppm. Entre 10-20 cm el suelo ya es un B2t pleno, con 2% de materia orgánica y 1-3 ppm de fósforo.

Los datos analíticos del tipo (INTA 1974 a) se presentan en la Tabla 3. Este perfil tipo fue descrito a 71 m de altitud sobre el nivel del mar:

Ap 0-14 cm; pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en seco; franco limoso; estructura granular muy fina débil; friable; no plástico, no adhesivo; limite inferior abrupto, suave.

A12 14-34 cm; pardo oscuro (10 YR 3/3) en húmedo y pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) en seco; franco limoso; estructura granular fina débil; friable; no plástico, no adhesivo; limite inferior claro, suave.

A3 34-45 cm; pardo oscuro (10 YR 3/3) en húmedo y pardo (10YR 5/3) en seco; franco limoso a franco arcillo limoso; estructura granular fina débil; friable; no plástico, no adhesivo; limite inferior claro suave.

B1 45-58 cm; pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo y pardo (10YR 5/3) en seco; franco arcillo limoso; estructura en bloques subangulares medios moderados; friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; limite inferior gradual, suave.

B21t 58-77 cm; pardo oscuro (7.5YR 3/2) en húmedo y pardo a pardo oscuro (7.5YR 4/4) en seco; arcillo limoso; estructura en prismas medios y gruesos moderados que rompen a bloques angulares; firme; muy plástico, muy adhesivo; barnices abundantes; limite inferior gradual, ondulado.

B22t 77-97 cm; pardo a pardo oscuro (7.5YR 4/4) en húmedo y pardo (7.5YR 5/4) en seco; franco arcillo limoso a arcillo limoso; estructura en prismas

medios y gruesos moderados; firme; plástico, ligeramente adhesivo; barnices abundantes; limite inferior gradual, ondulado.

B3 97-140 cm; pardo oscuro (7.5YR 3/2) en húmedo y pardo (7.5YR 5/4) en seco; franco limoso; estructura en bloques subangulares medios débiles; friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; limite inferior gradual, ondulado.

C 140-220 cm; pardo fuerte (7.5YR 5/6) en húmedo y amarillo rojizo (7.5YR 6/6) en seco; franco limoso; masivo; friable.

3.1.2.- Suelo Serie Los Cardos

En la localidades de Bouquet y Las Rosas, Santa Fe, se realizaron ensayos en un suelo Argiudol típico de la Serie Los Cardos. Se trata de un suelo profundo, y bien drenado. El paisaje es suavemente ondulado de lomas planas extendidas y bien drenadas superficialmente. Los datos analíticos de este perfil tipo se presentan en la Tabla 4. En el sector seleccionado, el horizonte A1, con 20 cm de espesor presenta textura franco limosa, tenor de materia orgánica del 3% y 35 ppm de fósforo. Por debajo del A comienza el B1 de 10 cm de espesor pardo oscuro, franco arcillo limoso. A los 30 cm comienza el B2t de 70 cm de espesor, franco arcillo limoso a arcillo limoso, de estructura prismática, con 40 % de arcilla, baja fertilidad y elevada resistencia a la penetración de raíces.

Por debajo continúa el horizonte transicional B3 de 20 cm de espesor y luego el C de color pardo, franco limoso, estructura masiva con tosquillas de carbonatos.

Los datos analíticos del perfil tipo (INTA 1974 b) se presentan en la Tabla 3. El perfil tipo fue descripto a 2 km al este de Las Rosas, Departamento Belgrano, Prov. de Santa Fe, en altitud de 93 m sobre el nivel del mar:

A1 0-18 cm: pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2.5); franco limoso; estructura en bloques subangulares finos y débiles a moderados; friable en húmedo, ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; raíces abundantes; límite claro y suave.

Tabla 4. Propiedades generales de la Serie Los Cardos.

Horizonte	A1	B1	B21t	B22t	B23t	B3	C1	Cca
Prof. Muestra cm	0-18	18-26	26-52	52-80	80-104	104-120	120-149	149+
Materia orgánica, %	2,8	1,7	0,9	0,6	0,4	0,2	0,2	0,1
Carbono orgánico, %	1,67	1,02	0,54	0,37	0,25	0,15	0,12	0,09
Nitrógeno total, %	0,160	0,118	0,065	0,053	0,041	0,032	0,029	
Relación C/N	10	9	8	7	6	5	4	
Arcilla, < 2 μ , %	26,5	26,9	37,9	38,9	37,8	28,7	27,5	22,0
Limo, 2-50 μ , %	70,5	70,7	60,4	59,3	59,7	68,0	68,0	71,8
Arena muy fina, 50-100 μ , %	2,4	2,3	1,6	1,7	1,8	1,7	3,2	4,8
Arena fina, 100-250 μ , %	0,4	0,1	0,1	0,1	0,7	1,6	1,1	1,2
Arena media, 250-500 μ , %	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2
Arena gruesa, 500-1000 μ , %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Arena muy gruesa, 1-2 mm, %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Calcáreo, CaCO ₃ , %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,7
Eq. humedad, %	30,4	30,3	34,8	36,8	35,2	30,2	28,9	27,3
pH en pasta	5,9	5,9	6,0	6,0	6,1	6,2	6,3	7,7
pH en agua, 1:2,5	6,1	6,1	6,5	6,7	6,8	6,8	7,1	8,3
pH en ClK	5,2	5,0	5,1	5,1	5,3	5,3	5,5	6,6
Cationes de cambio, m.e./100 g								
Ca ⁺⁺	12,3	11,5	17,2	19,1	18,6	17,8	18,0	15,5
Mg ⁺⁺	1,8	1,6	2,9	3,8	3,8	3,4	3,3	3,1
Na ⁺	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
K ⁺	2,2	1,6	2,2	2,7	2,8	2,6	2,5	2,5
Acidez intercambio	0,5	0,5	0,4	0,7	0,7	1,2	0,8	1,0
Suma de bases, m.e./100 g (S)	16,4	14,8	22,4	25,8	24,4	24,1	24,0	21,3
CIC, m.e./100 gr (T)	20,7	20,0	26,5	29,3	27,9	25,1	24,4	20,0
Saturación con bases % (S/T)	79	74	84	88	91	96	98	99

B1 18-26 cm: pardo oscuro en húmedo (10YR 3/3); franco arcillo limoso; estructura en bloques subangulares finos y moderados; firme en húmedo, plástico y ligeramente adhesivo; raíces abundantes, límite claro y suave.

B21t 26-52 cm: pardo oscuro en húmedo (7.5YR 4.2); franco arcillo limoso pesado; estructura en prismas medios y débiles, que rompen a bloques angulares, medios y fuertes; firme en húmedo; plástico y adhesivo; abundantes barnices arcillo humitos (7.5YR 3/2); raíces abundantes; límite gradual y ondulado.

B22t 52-80 cm: pardo oscuro en húmedo (7.5YR 4/2); franco arcillo limoso pesado; estructura en prismas gruesos y moderados, que rompen a bloques angulares, gruesos y fuertes; firme en húmedo; plástico y adhesivo; abundantes barnices arcillo humitos (7.5YR 3/2); raíces escasas; límite gradual y ondulado.

B23t 80-104 cm: pardo a pardo oscuro en húmedo(7.5YR 4/4); franco arcillo limoso pesado; estructura en bloques angulares, medios y moderados a fuertes; firme en húmedo, plástico y adhesivo; escasos barnices arcillo húmicos; raíces escasas; límite gradual y ondulado.

B3 104-120 cm: pardo en húmedo (7.5 YR 5/4); franco arcillo limoso; estructura en bloques subangulares medio y moderados; firme en húmedo, plástico y adhesivo; raíces escasas; límite gradual y ondulado.

3.2.- Desarrollo del descompactador con distribuidor de yeso

Mediante un Acuerdo de Asistencia Técnica entre el Instituto de Suelos-INTA Castelar y la empresa Agrotécnica Las Rosas SRL, firmado en agosto de 1999, se construyó un equipo de labranza profunda combinado con un distribuidor de enmiendas a 20-30 cm de profundidad sobre la base de su equipo de labranza profunda, el Culti-vie. El prototipo construido consta de dos láminas descompactadoras, curvas, flexibles, al que se adaptó un dosificador para aplicar enmiendas.

El diseño de las hojas y la distancia entre las mismas es similar al propuesto por Unger, 1993, que aplicó en la descompactación de suelos Molisoles con un horizonte B espeso. Ellington, 1986, utilizó un subsolador hasta 0,40 m de profundidad, y a 0,50 m de separación entre pasadas, con hojas de 2,5 cm de espesor de acero especial.

Se utilizó un distribuidor de calcáreo con tubos de descarga en cada hoja subsoladora y dos cuchillas circulares separadas 0,70 m, con dos tolvas con dosificadores individuales (Varsa et al, 1997; Franzluebbers et al, 2002), a 0,35 m de profundidad, con capacidad de aplicación de 0,6 Mg/ha.

La capacidad de aplicación es 0,6 Mg/ha de yeso granulado, en bandas de 0,05 m de ancho que en esa banda representan 7 Mg/ha que son suficientes para producir un impacto en el suelo con respuesta inmediata en los cultivos (Jayawardane et al, 1995), ya que interviniendo en una proporción pequeña del área de suelo, se extiende el mejoramiento a toda la superficie compactada. En este caso la superficie removida es el 7,14%, considerando franjas removidas de 0,05m de ancho distanciadas 0,70 m entre sí.

En la Figura 7 se puede observar el equipo de descompactación con distribuidor de yeso, junto con la enmienda granulada aplicada. En la Figura 8 se presenta un esquema del descompactador.

Figura 7. Equipamiento y enmienda granulada empleados en las experiencias de campo.

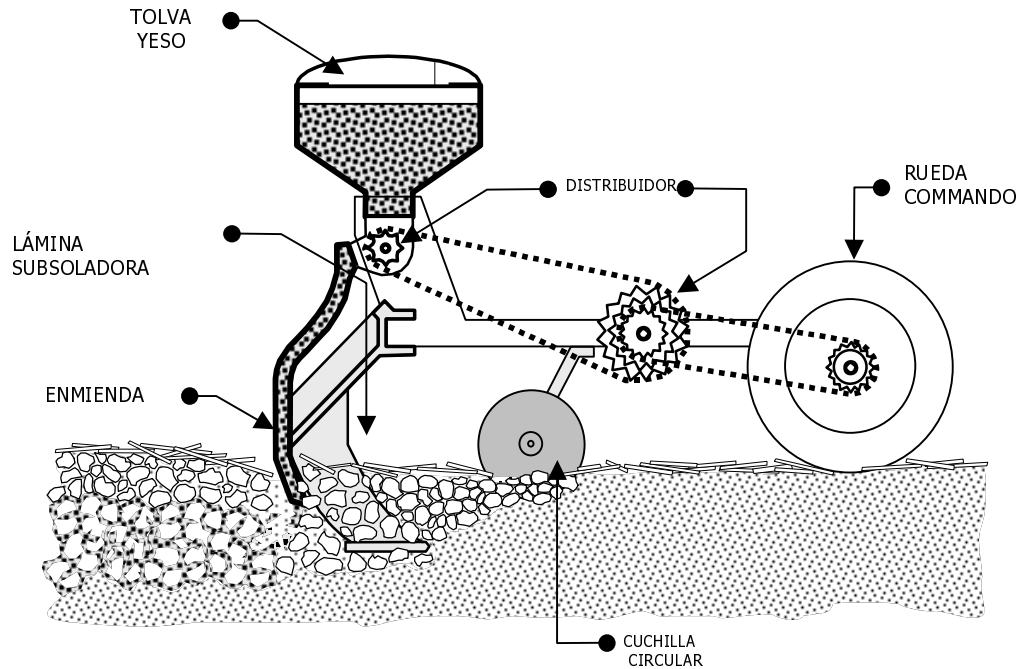


Subsolador de hoja delgada con distribuidor de yeso en profundidad.



Sulfato de calcio granulado, 2-3 mm diámetro.

Figura 8. Esquema del subsolador de hoja delgada para aplicación de enmienda profunda.



El subsolador logra poner la enmienda en contacto directo con el suelo recién hendido. Este subsolador permitió poner el yeso directamente dentro del suelo compactado, Richards et al., 1995.

El yeso aplicado fue "Asufrar" con 90% de $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, 90% de pureza, granulado con partículas de 2-3 mm de diámetro.

3.3.- Propiedades generales del suelo

Los métodos usados para determinar las propiedades generales del suelo y los parámetros considerados para observar la evolución en los tres años del estudio se describen a continuación.

3.3.1.- Textura

La textura del suelo se determinó por método de la pipeta de Robinson y tamizado propuesto inicialmente por Kilmer et al, 1949. El protocolo empleado para el análisis granulométrico ha sido descrito como Método Internacional por Guitián y Carballas, 1976 y está basado en los principios físicos de la sedimentación para la fracción limo y arcilla y el tamizado para las fracciones de arena.

Se pesó 20 g de suelo tamizado por 2 mm, al que se le añadió H_2O_2 al 6% para la eliminación de la materia orgánica, dejando el suelo en contacto con el H_2O_2 hasta observar espuma, lo que puede suceder a las 48 horas, dependiendo de la cantidad de materia orgánica. Una vez destruida la materia orgánica, se agregan 50 ml de HCl 1 N para disolver los compuestos de hierro y aluminio que contribuyen a la agregación. Se esperan 20 minutos agitando de vez en cuando, luego se filtra y se lava con agua destilada hasta que el filtrado no dé positivo a Cl (test de NO_3 Ag).

A continuación se trasvasa el contenido de los filtros a botellas de agitado de 1 litro , procurando no pasar de 0,5 l de suspensión durante el proceso, posteriormente se agregan 20 ml de Hexametáfosfato de Na con carbonato de Na (Calgon) como agente dispersante haciendo que las partículas de arcilla no floculen. Se agita 2 horas.

Una vez dispersada, se tamiza la muestra en húmedo con malla de 50 micras, para separar las arenas del resto de las fracciones, procurando no utilizar más de 1 l de agua. Las arenas se secan en cápsulas para su posterior separación en arena gruesa, AG, y arena fina, AF, usando un tamiz de 200 micras.

El resto del material se lleva a probetas de 1 litro, se agita para homogeneizar la suspensión y se toman alícuotas a diferentes tiempos, desde que se deja de agitar, con pipeta Robinson. Los tiempos de muestreo son:

t=0 (Limo Grueso + Limo Fino + Arcilla)

t=4`48''(Limo Fino + Arcilla)

t= 8 hs (Arcilla)

Estas alícuotas se colocan en crisoles y se secan en estufa a 110° C hasta peso constante. Los resultados son representados en porcentajes y para determinar la clase textural se utilizan los porcentajes de contenido de arena total, limo total y de la arcilla, con lo que se entra al diagrama textural USDA, 1996.

3.3.2.- Mineralogía: Difracción de Rayos X

Las propiedades físicas y químicas del suelo están controladas en buena medida por la composición mineralógica y especialmente por los componentes de la fracción arcilla. La identificación de las especies minerales de la fracción arcilla se lleva a cabo mediante difracción de Rayos X. Los fundamentos de esta técnica han sido descritos por numerosos autores, entre ellos Whittig y Allardice, 1986.

Preparación de las muestras. Se destruye la materia orgánica con H₂O₂ y se le añade HCl diluido para eliminar parte de los geles. Se dispersan con amoníaco por agitación, dejando la muestra en reposo durante 16 horas, al cabo de las cuales se extraen por sifonado los 10 cm superiores de la suspensión secándola en estufa a una temperatura inferior a 60 °C, como describen Guitián y

Carballas, 1976. La mineralogía de esta fracción se estudió mediante difracción de rayos X.

Análisis por difracción de rayos X. Se obtuvieron difractogramas de polvo cristalino y agregados orientados de muestras saturadas en Mg, solvatadas con etilenglicol y calentadas durante dos horas a 300°C y 500°C.

Interpretación de los difractogramas. La identificación de las especies minerales más comunes se llevó a cabo comparando los máximos de difracción de las muestras de agregados orientados saturadas en Mg, solvatadas con etilenglicol y calentadas a 300°C y 500°C como describen Whittig y Allardige, 1986. Para la interpretación de los diagramas también se utilizaron las tablas compiladas por Brown y Bridley, 1980.

Además, se realizó una estimación semicuantitativa, expresando los resultados de acuerdo con la siguiente notación:

Muy abundante	++++	más del 50% del total de la arcilla
Abundante	+++	30-50% del total de la arcilla
Frecuente	++	10-30% del total de la arcilla
Ocasional	+	3-10% del total de la arcilla
Trazas	tr	menos del 3% del total de la arcilla

3.3.3.- Análisis químicos

3.3.3.1.- pH en agua

El pH se midió en una suspensión de suelo en H₂O (relación suelo/solución 1:2,5), de acuerdo con el procedimiento descrito por Guitián y Carballas, 1986, por el método del potenciómetro. El pH medido en agua, denominado pH actual expresa la cantidad de H⁺ en la solución del suelo, sin tener en cuenta los iones ácidos existentes, ya que no contabiliza los fijados sobre el complejo de cambio

(iones H^+ y Al^{+3}). Para clasificar el suelo de acuerdo a los valores de pH en agua se usaron los criterios que figuran en USDA, 1975.

3.3.3.2.- Conductividad eléctrica

La salinidad del suelo se determinó por el método conductimétrico, expresándose en mS/cm de acuerdo con Richards, 1954, 1970. El extracto acuoso del suelo se preparó llevándolo a su capacidad máxima de agua, o "humedad de saturación". Este método surge como una variante de la "pasta saturada". La pasta se preparó agregando agua destilada a una muestra de suelo seco y tamizado, al tiempo que se agitaba. La pasta saturada se colocó en embudos Buchner con papel de filtro, procediendo a extraer la muestra de agua por filtrado.

3.3.3.3.- Contenido de carbono orgánico (MO)

La determinación del carbono orgánico se llevó a cabo siguiendo el método de Walkley-Black, 1934, modificado por Greweling y Peech, 1965. Se basa en la oxidación de la materia orgánica del suelo por vía húmeda, con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en medio ácido, usando ácido sulfúrico (H_2SO_4). La valoración del agente oxidante consumido ($K_2Cr_2O_7$) se realiza con sulfato ferroso amónico 6-hidrato (sal de Mohr). Se trata de una valoración por retroceso, ya que se valora con sal de Mohr el exceso de $K_2Cr_2O_7$ que no fue necesaria para oxidar la materia orgánica del suelo.

3.3.3.4.- Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico, CIC, se determinó por saturación con ión amonio pH 7, usando acetato de amonio ($AcNH_4$), como describen Peech et

al, 1974. De acuerdo con este método el ión amonio desplaza a los cationes de cambio alcalinos, sodio (Na^{+1}) y potasio (K^{+1}) y alcalinotérreos, calcio (Ca^{+2}) y magnesio (Mg^{+2}) de las posiciones de cambio. El exceso de amonio se lava con alcohol y, posteriormente, se realiza una segunda percolación con NaCl 1N, de forma que los iones amonio son desplazados por el sodio. En el percolado se determinaron calcio y magnesio por espectroscopía de absorción atómica y sodio y potasio por espectrofotometría de llama como describen entre otros Richards, 1970 y Jackson, 1976.

Para la determinación de la máxima capacidad de absorción (valor T) se parte del suelo saturado con amonio, después del tratamiento de AcNH_4 , $\text{pH} = 7$. Se desplaza el amonio adsorbido por calcio, percolando con una solución de cloruro cálcico.

3.3.3.5.- Fósforo Bray

En 1945, Bray y Kurtz proponen un método rápido para estimar las formas de fósforo disponible para las plantas. En resumen, el método conocido como Bray 1 se trata de una extracción con una solución mezcla de NH_4F 0,03N y HCl 0,025 N, que se basa en el efecto solubilizador del H^+ sobre el P del suelo y la capacidad del ión F^- de bajar la actividad del Al^{+3} , evitando la readsorción de los fosfatos en el sistema de extracción, según Soil and Plant Analysis Council, 1992 y Kuo, 1996.

Inicialmente, Bray y Kurtz, 1945, plantearon trabajar con 1 gramo de suelo y 7 ml de solución extractiva, agitando vigorosamente por un minuto, para luego determinar el P en el extracto.

En nuestro país este método se aceptó ampliamente con algunas modificaciones propuestas por el INTA Balcarce. Las mismas consistieron en

prolongar el tiempo de agitación a 5 minutos, hecho que facilita la operatoria, además de trabajar con 2,5 g de muestra y 20 ml de solución extractiva, lo que da una relación de 1:8. En 1991, el Comité de Química de la AACS realizó la II Jornada Nacional de Fósforo en el suelo, donde se propuso la determinación del P disponible en una relación suelo-solución extractiva de 1:7 agitando durante 5 minutos como método de referencia dentro del Programa de Métodos Analíticos de Referencia del SAMLA.

3.3.3.6.- Fluorescencia de Rayos X

Mediante esta técnica analítica se pueden determinar macroelementos y microelementos a una concentración normal del suelo, como exponen Norrish and Chappel, 1977 o Jones, 1982, entre otros.

La técnica de fluorescencia de rayos X está basada en el principio de que si un átomo es bombardeado con fotones de alta energía, algunos de sus electrones son expulsados. Como otros electrones rellenan los niveles vacantes de energía ocupados por los electrones expulsados, ellos emiten un cuanto de radiación característica de este tipo particular de átomo. De aquí que, cada elemento tenga una propia serie de características de emisión o de líneas de fluorescencia de rayos X, Jones, 1982, Jones, 1991.

Algunas aplicaciones potenciales de la fluorescencia de rayos X, de acuerdo con la mayor parte de los autores, son las siguientes:

a) Determinación cualitativa rápida de los elementos presentes en un material desconocido prácticamente sin preparación de la muestra y determinación semicuantitativa usando factores sencillos de corrección.

b) Detección de todos los elementos de la tabla periódica por debajo del B desde el límite de detección de unas pocas ppm hasta el 100%.

c) Determinación cuantitativa de todos los elementos de una muestra (excluyendo a los elementos con número atómico por debajo de 5).

d) Composición en superficie (1 μm) comparada con el volumen (> 10 μm) usando líneas de emisión con diferente profundidad de penetración en determinadas muestras (cerámicas).

La fluorescencia de rayos X ofrece amplias ventajas. Generalmente, el método de rayos X no es destructivo y, por tanto, puede utilizarse sin dañar la muestra. Otra ventaja radica en la precisión y la rapidez del procedimiento, de acuerdo con Haneklaus et al., 1994.

No obstante, la fluorescencia de rayos X presenta también algunos inconvenientes. No es un método tan sensible como otros métodos ópticos. En el más favorable de los casos, se pueden medir concentraciones de unas pocas partes por millón. Por otra parte, los métodos de fluorescencia de rayos X no son adecuados para elementos ligeros; las dificultades en la detección y en la medida aumentan progresivamente por debajo del número atómico 23 (vanadio) según Skoog y Leavy, 1994. Otra desventaja de este procedimiento es su elevado coste. Además, las interferencias categorizadas como coincidencias espectrales o efectos matriciales constituyen otra dificultad añadida a la hora de realizar el análisis. El principal inconveniente de este método es la escasa sensibilidad que presenta, según Alloway, 1995. Esto hace que no sea posible medir algunos elementos como molibdeno y cobalto y que otros como cadmio y mercurio no se puedan medir sin preconcentración. Pese a ello, las técnicas de difracción de rayos X son muy empleadas en análisis de suelos.

Para llevar a cabo el análisis, una vez secas y tamizadas las muestras a través de un tamiz de 2 mm, se pesan 10 g de suelo finamente molido, mediante un mortero de ágata, mezclándolo con 2,5 g de cera de carbono Hoescht

"micropowder". Las pesadas se realizan en una balanza con una precisión de dos décimas de gramo. La mezcla se introduce en una cápsula de aluminio de 4 cm de diámetro y 1 cm de profundidad, sometiéndola a una elevada presión con la finalidad de obtener pastillas para su análisis posterior, según el protocolo propuesto por van Lagen, 1996.

Sobre las pastillas se realiza la determinación semicuantitativa de los elementos, utilizando un espectrómetro secuencial de rayos X SIEMENS SRS 3000, con un tubo de ánodo de radio de 3000 W de potencia de ventana frontal de 125 μm de espesor. Las concentraciones de los elementos fueron estimadas mediante el programa GeoQuant versión 2.1, expresándose los resultados en % para los elementos mayoritarios (Si, Al, Fe, K, Mg, Ca, Ti, Na, P, Ba, Cl) y en ppm para el caso de los elementos minoritarios (Mn, Cu, Zn, Zr, Cr, Ni, Rb, V, W, Sr, Y, Cu, Sc, Ga, Pb, Nb, etc).

3.3.4.- Análisis físicos

3.3.4.1.- Densidad aparente

Se determinó la densidad aparente a 0-10 cm y 10-20 cm de profundidad. Se usaron cilindros de acero de 100 mm de diámetro y 100 mm de altura y el muestreo se hizo por triplicado.

La determinación se llevó a cabo por el método del cilindro descrito entre otros en Guitián y Carballas, 1976. Se introduce un cilindro de dimensiones conocidas en el suelo con la ayuda de una sonda, se quita y se enrasa ambas caras del cilindro con un cuchillo, evitando perder suelo y que el exterior del tubo no tenga suelo adherido. Se vacía el cilindro en bolsa de polietileno y se lleva a laboratorio.

El suelo es secado a 105°C y se determina la DA relacionando el peso del suelo seco con el volumen del cilindro:

$$DA = PS/V \quad (1)$$

DA: densidad aparente en g/cm³

PS: peso seco a 105° del volumen de suelo, en gramos

V: volumen del cilindro en cm³.

3.3.4.2 – Porosidad total

Se calcula a partir de la densidad aparente y la densidad real, mediante la expresión:

$$n = 1 - DA/DR \quad (2)$$

DA: densidad aparente

DR: densidad real del suelo (2,65 en nuestros suelos)

3.3.4.3.- Porosimetría por intrusión de mercurio

El principio físico de la determinación de la distribución de los tamaños de poros por intrusión de mercurio (Hg), es inverso al de la determinación de la curva característica de humedad mediante el principio de succión. El Hg es introducido dentro del sistema poroso de los agregados del suelo por presión, de modo que la determinación consiste en la medida del volumen de Hg que va entrando a cada incremento de presión, Fiès, 1984; Fiès y Bruand, 1990.

La distribución del tamaño de poro se midió en agregados individuales de aproximadamente 1,0 a 1,2 g.

Se utilizó un porosímetro Micromeritics 9310 con dos unidades que permiten operar desde $3 \cdot 10^{-3}$ hasta 200 Mpa. El equipo empleado ha sido descrito con detalle por Benito et al., 1991 e Ingaramo, 2003. Asumiendo que los poros son cilíndricos, el diámetro equivalente medio d , se calcula a partir de la presión P , ejercida para forzar la entrada de Hg, la tensión superficial σ , y el ángulo de contacto, Θ , de acuerdo con la expresión:

$$D = -4\sigma \cos \Theta / P \quad (3)$$

Con este dispositivo se miden diámetros equivalentes entre $415 \mu\text{m}$ y 6 nm . Para efectuar los cálculos, se empleó un valor medio de $\Theta = 130^\circ$ y de $\sigma = 0,484 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$.

La muestra de suelo se introduce en un dilatómetro y se lleva a la unidad de macroporos, donde se realiza el llenado con el Hg, una vez eliminado el aire de la muestra mediante vacío.

3.3.4.4.- Superficie específica

La superficie específica (SE) del suelo es el área de la superficie externa más el área de la superficie interna de las partículas por unidad de masa, se expresa en m^2/g . Depende esencialmente del tamaño de las partículas elementales que lo constituyen, así como de su composición mineralógica, y, en menor medida, está relacionada con la forma de dichas partículas.

Este parámetro proporciona un índice de la reactividad de la superficie y también se considera como una medida independiente y complementaria de la granulometría; con frecuencia presenta correlaciones elevadas con el contenido en materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico. La superficie específica es importante para determinar la reactividad de los suelos. La

cantidad de superficie varía de forma inversamente proporcional al tamaño de las partículas.

Los métodos químicos más comunes de medida de la superficie específica están basados en la adsorción de gases o en la absorción selectiva de moléculas en suspensiones acuosas de suelo como describen Carter et al, 1986, y Santamaría et al., 2002. Con frecuencia se emplean N_2 o H_2O como adsorbentes, pudiendo afectar las condiciones de preparación de la muestra a los resultados. En este trabajo se evalúa la influencia de las condiciones de preparación de la muestra, en particular la temperatura a que se lleva a cabo la desgasificación, sobre las isothermas de adsorción de N_2 y la superficie específica.

El análisis de adsorción de gas se muestra como una de las técnicas más útiles y fiables para la determinación de la morfología de estructuras porosas complejas. La determinación del tamaño y volumen de poro en materiales micro y ultramicroporosos es complicada debido al pequeñísimo diámetro de poro, que se encuentra en el rango de las dimensiones moleculares del nitrógeno o del argón.

El proceso de adsorción de un gas sobre una superficie sólida, ya sea activa o no, consiste en la acumulación de una fase fluida sobre la superficie del sólido. Tal fenómeno se caracteriza por la energía de interacción entre el gas (adsorbato) y el sólido (adsorbente). En la adsorción física, la cantidad de fase fluida adsorbida disminuye al aumentar la temperatura. A temperatura constante, la cantidad adsorbida corresponde a una presión relativa P/P_0 , donde P representa la presión real del gas y P_0 la presión de vapor saturada del adsorbato.

Normalmente se obtiene una monocapa de moléculas adsorbidas a una presión relativa de 0,1. Esta técnica permite, al determinar el volumen de gas adsorbido a distintas presiones relativas, datos como la superficie específica del sólido, o la distribución de tamaño de poro.

El equipo usado fue un equipo de adsorción SORPTOMATIC 1990, con N₂ como adsorbato. Las prestaciones son las siguientes.

- Determinación de superficie específica a partir de los 0,2 m²/g (utilizando N₂ como adsorbato). No existe límite superior.
- Determinación de volumen de poro a partir de 0,0001 cm³/g.
- Determinación de radio de poro a partir de la dimensión del gas usado como adsorbato (en el caso del N₂: 3,5Å). El límite superior está determinado por el modelo de cálculo (normalmente entre 100 y 1000 Å).
- Admite tanto muestras pulverulentas como sólidos compactos.

La superficie específica y la distribución de tamaño de poros son parámetros fundamentales para la caracterización de sólidos. Propiedades como porosidad, fuerza, dureza, permeabilidad, selectividad separadora, corrosión, resistencia a tensiones térmicas, pueden estar directamente relacionadas con la estructura porosa del material. La técnica de adsorción de gases es una de las más utilizadas para determinar estos parámetros y estudiar propiedades de textura del material. Uno de los gases más utilizados como adsorbato es el nitrógeno.

Siempre que se desee determinar la superficie específica es necesario someter la muestra a un proceso de desgasificación, que se puede ver favorecido con un aporte de calor, con el fin de que los contaminantes adsorbidos en la muestra original por haber estado expuesta a la atmósfera, sean eliminados completamente de la superficie.

Transcurridas unas horas de desgasificación, la muestra sólida es enfriada bajo alto vacío hasta temperatura del nitrógeno líquido y a continuación se inicia un proceso de inyección de adsorbato (N₂) en incrementos controlados. Después

de cada dosis de adsorbato inyectado, se alcanza presión de equilibrio entre adsorbato y adsorbente y se calcula la cantidad de gas adsorbido.

El volumen de gas adsorbido a cada presión (a una temperatura constante) define una isoterma de adsorción, de la cual se puede determinar el gas requerido para formar una monocapa sobre la muestra. Conocido el área que ocupa cada molécula de gas absorbido, se puede calcular el área superficial de la muestra. Continuando este proceso hasta que se produzca la condensación del gas sobre los poros, se puede evaluar la estructura fina porosa de la muestra.

Inicialmente la condensación de gas se produce sobre los poros más estrechos, y conforme aumenta la presión se va extendiendo a otros poros más anchos, y termina por alcanzar la saturación, momento en el cual todos los poros están llenos de líquido. A continuación se va reduciendo gradualmente la presión del gas adsorbato, produciéndose la evaporación del gas condensado sobre el sistema. La evaluación de las ramas de adsorción y desorción de estas isotermas, junto con la histéresis observada, revelan información sobre el tamaño de poro, área del poro y forma del poro.

Los datos adquiridos son procesados y evaluados siguiendo distintos métodos conocidos: Langmuir, BET, BJH, de Boer t-Plot y otros. La teoría del método BET, Brunauer, Emmet, y Teller, 1938, es el modelo más popular para determinar la superficie específica, que incorpora la formación de multicapas. También es posible evaluar el área superficial según el modelo de Langmuir que se basa en la monocapa formada sobre la superficie del sólido.

El método BJH, Barret, Joyner y Halenda, 1951, es un procedimiento para el cálculo de distribuciones de tamaños de poro a partir de las isotermas experimentales usando el modelo Kelvin de llenado de poros. Este método sólo se aplica al rango de los mesoporos y también en el entorno de los macroporos de menores dimensiones.

3.3.4.5.- Constantes hídricas

Curvas de retención hídrica con olla y membrana de Richards a: 5kPa, 10kPa, 50kPa, 100kPa, 300kPa, 500kPa y 1500kPa, con agregados de 2-3 mm obtenidos por tamizado de suelo seco.

La curva característica de humedad del suelo se mide con el aparato de Richards, 1947. Es una cámara con aire a presión que obliga al agua de las muestras de suelo saturadas, a atravesar la membrana o plato poroso y cuando llegan al equilibrio con dicha presión, tienen retenida la humedad de ese punto característico de la curva.

A bajos potenciales de retención, próximos a saturación, el agua retenida por el suelo y por lo tanto la porosidad aumenta con el contenido de materia orgánica, de acuerdo con Hamblin, 1977 y Guérif, 1987.

3.3.4.6.- Contenido de humedad gravimétrica

Se realizó por el método gravimétrico según describen Guitián y Carballas, 1976. Se tomaron tres puntos en cada parcela de estudio y se extrajeron con barreno calador muestras cada 10 cm hasta 50 cm.

Cada muestra se guardó en bolsitas de polietileno con cierre hermético y se trasladaron al laboratorio. Se pesaron para obtener el peso húmedo PH, se secaron a 105° y luego de obtenido el peso seco PS, se pudo calcular la humedad de cada muestra W, con la ecuación:

$$W = \frac{PH - PS}{PS} \times 100 \quad (4)$$

W: porcentaje de humedad del suelo

PH: peso húmedo

PS: peso seco a 105°C

T: tara de pesafiltro

3.3.4.7.- Resistencia a la penetración

Se realizó un perfil de resistencia a la penetración de cono, con un penetrómetro de golpes, teniendo en cuenta el contenido de humedad. Estas mediciones permiten comparar los tratamientos en la misma fecha y no entre fechas diferentes.

El penetrómetro de golpes, de cono de 30° y 2,5 cm de generatriz (Norma IRAM 8063), con medición cada 5 cm hasta 50 cm de profundidad y con 10 repeticiones en cada sitio. El golpe esta dado por una pesa de 2 kg que corre sobre el vástago del aparato. Desde 1m de altura, produce 1 kgm de trabajo. Esto se traduce con una ecuación a MPa, que es la unidad de expresión de los resultados.

En el extremo del vástago tiene un registrador gráfico obteniendo al final de cada medición una planilla que se analiza en gabinete. Dicho gráfico da instantáneamente una descripción sucinta de la compactación presente en cada sitio.

Este tipo de evaluación, se debe realizar en un mismo estado de humedad del suelo, para poder comparar diferentes situaciones de manejo. La humedad es la principal variable de que depende la resistencia a la penetración en un suelo determinado.

El método consiste en dejar caer una pesa desde una altura conocida, y registrar el número de golpes necesario para enterrar el penetrómetro a una profundidad determinada.

Los momentos de observación fueron siembra-emergencia y post-cosecha del cultivo, en cada uno de los cuales se efectuaron tres repeticiones por tratamiento entre los 0 y 60 cm de profundidad. Cada uno de los valores obtenidos corresponde a un tramo de 0.05 m del perfil.

En las determinaciones de RP se registró la humedad del suelo, a los fines de caracterizar la estrecha relación RP-HG y poder hacer comparaciones entre distintas humedades del suelo.

3.3.4.8.- Ensayos de compactación en laboratorio

Adicionalmente, se realizaron trabajos de simulación de compactación en laboratorio. El test de compactación de muestras se efectuó en los suelos de los dos sectores de la pampa ondulada, considerados en este trabajo, a los que se trató con yeso y muestras sin yeso.

Para este trabajo se construyó un aparato compactador. Dicho aparato consta de una palanca para aplicar pesos en su extremo y un pistón de 8 cm de diámetro.

El equipo empleado permite simular diferentes situaciones iniciales del suelo y evaluar la compactación producida, por medio de infiltración y conductividad hidráulica con suelo tomado de los campos en ensayo. Este procedimiento se empleó para estudiar el proceso de descompactación de diferentes densidades aparentes creadas y variadas dosis de enmiendas cálcicas.

3.3.4.9.- Infiltración

Los parámetros de infiltración instantánea, final y coeficientes de escurrimiento se determinaron mediante el empleo de un micro-simulador de lluvia descrito por Irurtia y Mon, 1994.

Este instrumento está integrado por un paralelepípedo de 1,5 m de altura y 0,25 x 0,25 m de base, donde tiene una parcela de acero clavada en el suelo con un vertedero en el que se recoge el escurrimiento. Sobre la superficie de la base (625 cm²) se aplica una cantidad conocida de lluvia (120 mm) con intensidad constante (100 mm. h⁻¹) mediante una placa con picos formadores de gota. En la Figura 9 se puede apreciar el equipo de infiltración usado.

Figura 9. Simulador de lluvia portátil de placa con goteros.



Cada cinco minutos se realiza la lectura del volumen que escurre en el vertedero y por diferencia con la lámina de lluvia aplicada, se calcula la lámina de infiltración. Produce una precipitación de intensidad regulable, con 13 kJ/m²/m de energía, con gotas de 2,8 mm de diámetro, que caen de 1,50 m de altura. Se recogió el escurrimiento con los sedimentos que arrastra en un recipiente en la boca del vertedero de dicha parcela. Los datos obtenidos cada

cinco minutos se registraron en una planilla electrónica permitieron obtener gráficos de la variación de la tasa de infiltración a lo largo del referido período.

Se calculó también el coeficiente de escurrimiento (CEsc), según Schwab et al., 1981 como:

$$CEsc (\%) = \frac{\text{Lluvia total} - \text{Infiltración total}}{\text{Lluvia total}} \quad (5)$$

Las mediciones se efectuaron en siembra-emergencia.

3.3.4.10.- Estabilidad estructural

Se determinó el índice de estabilidad estructural de De Boodt y De Leenheer, 1967, modificado. Además, se obtuvo el índice de percolación de acuerdo con Hénin et al., 1958, por tamizado en agua.

Las muestras se obtuvieron con un marco de 20 x 20 x 10 cm y posteriormente se dejaron secar al aire. La separación de agregados de diferente diámetro, se efectuó mediante el uso de nueve tamices de diferente malla, ubicados en un sistema mecánico de agitación.

El protocolo empleado en este trabajo, se indica a continuación:

La muestra de suelo extraída de 0-20 cm de profundidad se secó al aire. Se tamizó en seco en tres fracciones: 8-4.76 mm; 4.76-3.36 mm; 3.36-2 mm. Se pesó cada fracción y se llevó a porcentaje de la muestra total.

De acuerdo a la capacidad de campo de cada fracción, se calculó el volumen de agua para llevarlas a dicho punto de humedad. Con este volumen se le aplicó el goteo con bureta a cada muestra, desde 29 cm de altura, 8 ergios de energía de gota.

Ya humedecidas las muestras, se introdujeron en cámaras de incubación 24 horas, para homogeneizar la humedad en todos los agregados de la muestra. Se preparó una nueva batería de tamices: 1 mm, 0,5 mm; 0,3 mm y menor.

Una vez ordenados los tamices se sumergieron en el recipiente con agua y se volcó cada muestra en el tamiz superior de la batería. En nuestras condiciones experimentales, se hizo el tamizado en agua durante 5 minutos con una frecuencia de 30 oscilaciones y un rango de 2,5 cm.

Para simplificar la presentación y el tratamiento de la información, los agregados se agruparon en cuatro clases según su diámetro: mayores de 50 mm; entre 11,2 y 50 mm; entre 5 y 11,2 mm y menores de 5 mm.

Los agregados incluidos en las dos últimas clases mencionadas, fueron considerados como los de mayor vinculación con la presión de laboreo.

Las muestras se extrajeron en siembra-emergencia y post-cosecha del cultivo en los tratamientos labreados durante el ensayo y solamente en post-cosecha en los restantes. En todas las situaciones mencionadas y en cada una de las tres profundidades bajo estudio (0 a 20; 20 a 40 y 40 a 60 cm) se efectuaron tres repeticiones.

3.3.4.11.- Perfil cultural

El perfil cultural es una herramienta de diagnóstico agronómico que permite, con el examen de una capa de suelo (1.50 m de profundidad y 3 a 4 m de largo) deducir principios de acción para la práctica agrícola. El método y sus aplicaciones han sido descritos por Hénin et al., 1982.

La originalidad principal del método consiste en que permite efectuar una doble delimitación:

- vertical, distinguiéndose los horizontes antrópicos H y edafológicos P.
- horizontal, que resulta de una partición lateral L, la cual se admite que viene delimitada por las operaciones culturales.

En este trabajo, la evaluación del estado estructural mediante el método del perfil cultural se llevó a cabo según los criterios expuestos por Manichon, 1982, 1986, 1986, Gautronneau y Manichon, 1987, y por De Battista et al, 1994.

Tabla 5. Criterios para la descripción del estado interno de los terrones (Manichon, 1982).

ESTADO INTERNO	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS
Δ Delta (símbolo cerrado, poca porosidad)	Aspecto continuo. Las caras de fragmentación son poco rugosas, de forma típicamente concoidal. Porosidad estructural nula, la densidad de los terrones es la densidad "textural" (Stengel, 1979). Resulta de una compactación severa de origen antrópico (ruedas de tractor). Su cohesión es elevada en seco.
Φ Phi (O "fisurado" por I)	Deriva del estado Δ pero contiene inicios de fisuras creadas por agentes naturales (hielo) o durante una fragmentación por las operaciones de cultivo, en la medida en que el tenor de arcilla así lo permita.
Γ Gamma (símbolo abierto, alta porosidad)	Los agregados son visibles dentro de los terrones. Proviene de la aglomeración de elementos más finos, (tierra fina creada por los instrumentos o fragmentos bastante disgregables, resultando de los agentes naturales). La rugosidad de las cajas de fragmentación es elevada, la porosidad estructural es bastante variable, pero en ningún caso nula, la cohesión es mas débil que en los estados Δ y Φ .

Los estratos así definidos son el objeto de una descripción metódica:

- estructura del suelo: estado interno de los terrones (Tabla 5) y modo de ensamblaje de estos terrones (Tablas 6 y 7).
- estado hídrico del suelo.
- sistema radicular
- evolución de las materias orgánicas
- actividad biológica (especialmente mediante un protocolo complementario de observación y de conteo de la actividad de los lombrices).

Tabla 6. Criterios para la descripción del modo de ensamblaje de los terrones.

Modo de ensamblaje de los terrones - 2 ^{do} nivel de organización estructural - (Manichon 1982)			
UN ELEMENTO ESTRUCTURAL	ALGUNOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES		
Estructura continua	S. adherida entre ellos		Individuales
	Difícilmente disgregable	Fácilmente disgregable	
	↓	↓	
M	SD	SF	F
Masivo	Adherido Difícilmente disgregable	Adherido Fácilmente disgregable	Fragmentario

La síntesis de estas observaciones conduce a un diagnóstico sobre el funcionamiento de la población vegetal y el comportamiento de suelo según la influencia del clima y de las herramientas. A partir de este diagnóstico, un

diálogo se establece muy fácilmente con el agricultor, con el objetivo de ayudarlo a tomar sus decisiones técnicas.

Tabla 7. Criterios para definir los estados del los tipos o, b y c.

Definición y origen de los estados tipo o, b y c (Manichon 1986)	
ESTADO TIPO	DEFINICION Y ORIGEN
O	Predominio de los estados F y S, sin terrones decimétricos, ni cavidades importantes. Tierra fina abundante. Típicamente: prisma de tierra fuertemente desmenuza.
B	Predominio de M y FV, terrones decimétricos, separados por cavidades estructurales importantes. Poca tierra fina. Típicamente: prisma de tierra poco fragmentada (terrones grandes).
C	Predominio de los estados M y SD. Típicamente: efecto de una compactación post "laboreo" sobre tierra fuertemente desmenuzada.

La capa superior de los suelos cultivados sufre esfuerzos mecánicos variados ejercidos por las máquinas y los agentes naturales. Sus efectos son contradictorios: fragmentación y compactación, diferentemente distribuidos, donde las ruedas de la maquinaria afectan parte del volumen del perfil creando una variabilidad espacial del estado físico. Esta variabilidad no es aleatoria, por lo que se puede realizar una partición del volumen del suelo en base a causas conocidas.

Figura 10. Ejemplos de trincheras abiertas para la determinación del perfil cultural.



Partición vertical, se evalúa en trinchera excavada perpendicularmente a la dirección de las labores de la maquinaria, para determinar áreas y grados de compactación de variaciones bruscas del estado estructural y de las huellas de las diferentes herramientas, en el perfil hasta 50 cm de profundidad.

Se excava una trinchera de 1,30 m de ancho y 0,50 m de profundidad. Se coloca una barra de 1,30m graduada en el borde superior, y se sondea cada 10 cm de ancho hasta 50 cm de profundidad, estableciendo la ubicación de capas compactas, espesor de B1, B2, grietas, pisos de herramientas.

3.4.- Rendimiento

Se tomó como indicador biológico de la recuperación del suelo al rendimiento de soja. En los casos donde no se hizo soja se tomó el cultivo de verano implantado. El rendimiento se determinó, cosechando el área total de cada parcela, con máquinas normales utilizadas por los productores, ya que el diseño de los ensayos fueron planteados para poderlo hacer.

Se hizo la cosecha total de cada parcela, pesando por separado el volumen de grano de cada parcela, utilizando carros graneleros con balanza incorporada, con lo que se obtuvo el rendimiento exacto de cada tratamiento.

3.5.- Métodos estadísticos: módulo SAS

Análisis Estadístico sobre un diseño de bloques completos aleatorizados se analizaron los factores año, tratamiento, localidad, interacción de tratamiento por localidad, tratamiento por año bloque y error experimental.

Este análisis se realizó en pH, Fósforo, Materia orgánica, Conductividad eléctrica, Densidad aparente, Resistencia a la penetración y Rendimiento de los cultivos.

Luego se llevaron a cabo comparaciones de medias con el test de Duncan, con un nivel de probabilidad del 95% (error, $\alpha=.05\%$). El software estadístico utilizado fue SAS V8 (SAS Institute Inc., 1989. La referencia del mismo es: licenced to Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Dicho software se encuentra localizado en SITE=14759001.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

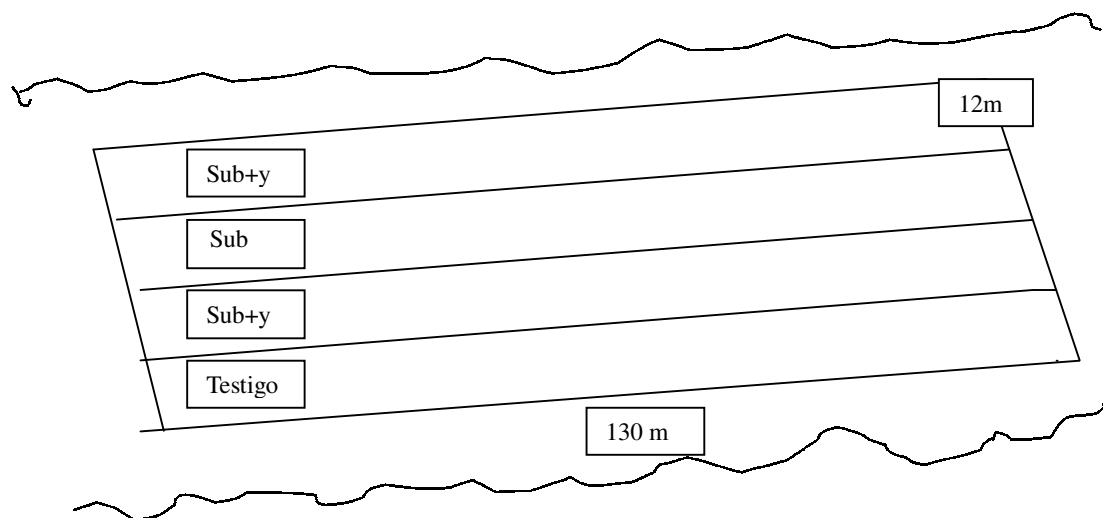
4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos llevados a cabo en las series de suelos Arroyo Dulce y Los Cardos. Las parcelas experimentales de la serie Arroyo Dulce se localizan en el establecimiento El Alba, Salto, provincia de Buenos Aires (BsAs). Las parcelas experimentales de la serie Los Cardos se ubican en el establecimiento La Peti, Bouquet y en el productor Pavoni, Las Rosas, provincia de Santa Fe. Los resultados, que incluyen análisis de las propiedades del suelo y rendimiento de los cultivos se exponen y discuten a continuación.

4.1.- Serie ARROYO DULCE: primer ensayo en El Alba, Salto

Se plantearon cuatro parcelas de 12 m de ancho por 130 m de largo entre dos terrazas del cultivo en contorno (Figura 11).

Figura 11. Diseño del primer ensayo de campo de la serie Arroyo Dulce en El Alba (Salto).



Sub=Subsolado; Sub+y=Subsolado + yeso

El ensayo se inició el 25 de julio de 2000. Una de las parcelas se dejó como testigo; otra parcela se descompactó con el Subsolador Prototipo a 0,35m de profundidad y las otras dos fueron descompactadas con el mismo subsolador, y además se aplicó una enmienda de 0,6Mg/ha de yeso granulado.

4.1.1-Textura

El análisis de textura en las parcelas experimentales se llevó a cabo para los sucesivos horizontes genéticos y los resultados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Textura del suelo de la serie Arroyo Dulce en El Alba (Salto).

Fracción, μm	Arroyo Dulce en El Alba (Salto)		
	A	B2t	C
Arcilla <2	24,6	39,8	19,3
Limo 2-50	62,6	48,2	59,5
Arena 50-100	11,1	10,1	17,9
Arena 100-250	1,3	1,8	2,4
Arena 250-500	0,3	0,1	0,6
Arena 500-1000	0,1	0,0	0,3

Estos resultados indican la existencia de una discontinuidad en lo que se refiere a la textura de los sucesivos horizontes. En efecto, el horizonte A es netamente franco-limoso, con aproximadamente 24% de arcilla y más de 60% de limo; el contenido de arena es bajo, de modo que se cifra en un 12,4 % para la arena fina y un 0,4 % para la arena gruesa. El horizonte B es arcillo-limoso con contenido de arcilla más elevado, próximo al 40% y casi 50% de limo; el contenido en arena es similar al del horizonte A. En el horizonte C, que también pertenece a la clase franco-limosa, disminuye abruptamente la arcilla en relación con el horizonte anterior hasta cerca de un 20%, elevándose el contenido de limo hasta un 60%; el contenido de arena del horizonte C es más

elevado, de modo que llega a superar el 20% en total, con un 20,3 % de arena fina y un 0,9 % de arena gruesa.

4.1.2- Mineralogía de las arcillas

Las muestras para análisis de la mineralogía de las arcillas se tomaron a las profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm.

La interpretación sintética de los diagramas de rayos X (Figura 12) de las muestras de arcilla se presenta a continuación:

0-10 cm

Minerales de arcilla: Illita predominante; interestratificados irregulares illita-esmectita, y caolinita en proporciones pequeñas y equivalentes.

Minerales accesorios: cuarzo, feldespatos

10-20 cm

Minerales de arcilla: Illita predominante; se incrementa ligeramente la proporción de interestratificados illita-esmectita en relación a la proporción observada en la muestra 0-10 cm, caolinita en pequeña proporción

Minerales accesorios: cuarzo, feldespatos

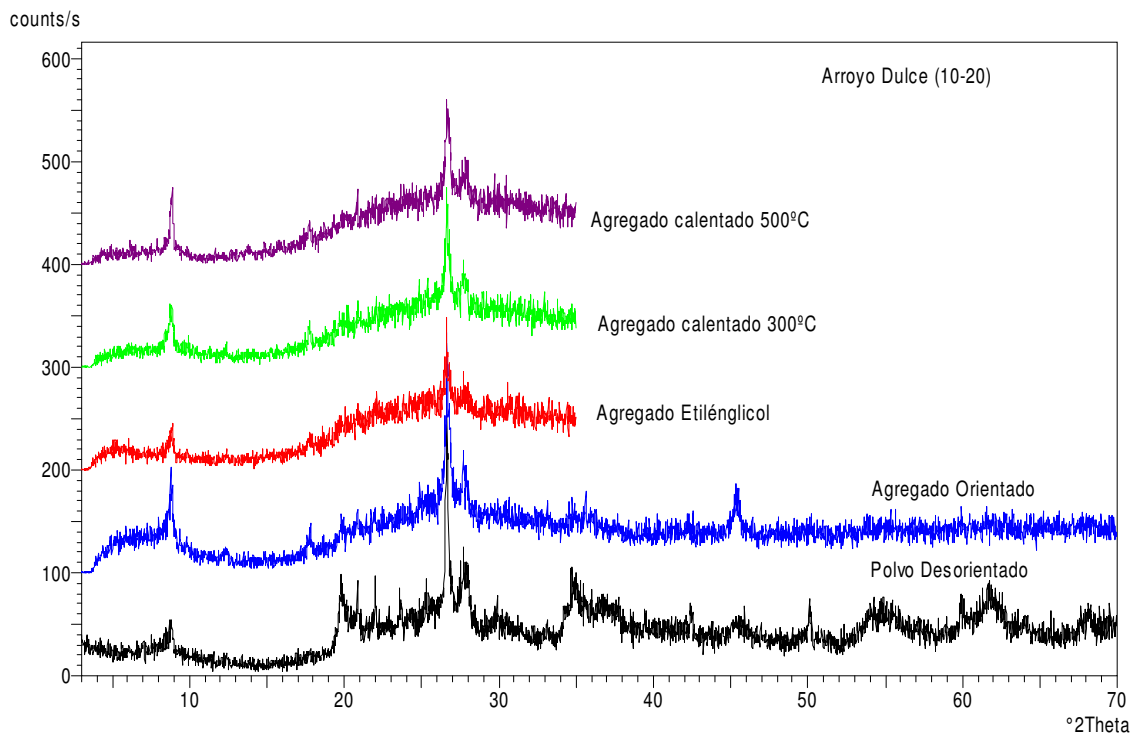
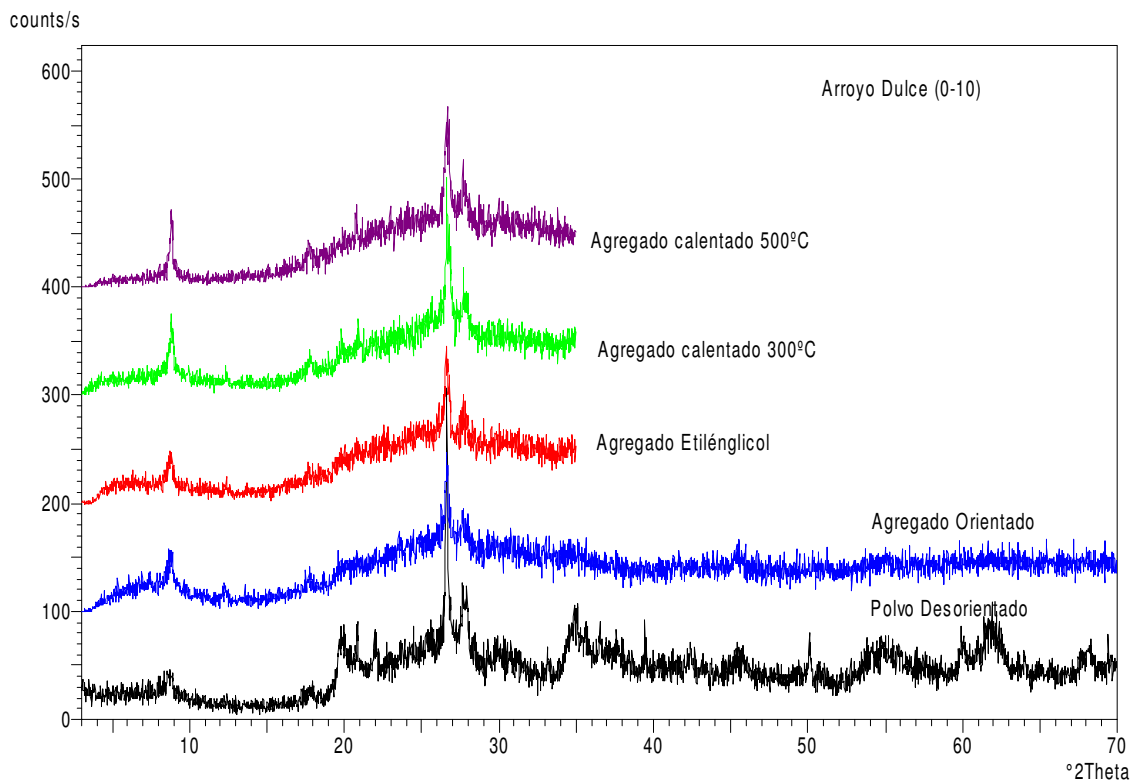
20-30 cm

Minerales de arcilla: Illita predominante; ligero aumento de los interestratificados irregulares illita-esmectita en relación a la muestra 10-20 cm, caolinita en pequeña cantidad.

Minerales accesorios: cuarzo, feldespatos

Se comprueba que la illita es el mineral predominante en todos los difractogramas de rayos X. Acompañan a la illita los interestratificados illita-esmectita, así como una pequeña proporción de caolinita. Aunque la composición mineralógica de fracción arcilla es relativamente homogénea en profundidad, se aprecia un incremento de los interestratificados illita-esmectita.

Figura 12. Difractogramas de la fracción arcilla de la serie Arroyo Dulce en El Alba (Salto) a 0-10 cm y 10-20 cm.



Estos resultados están de acuerdo con los estudios sobre composición mineralógica de los sedimentos loésicos que constituyen el material parental de los suelos pampeanos, en lo que se refiere a la composición de su fracción arcilla. En general, la illita aparece como el mineral predominante, mientras que las esmectitas y la caolinita son componentes menores, si bien existen excepciones a este esquema.

Se considera que la illita es un mineral heredado del material parental. Sin embargo las capas interestratificadas irregulares de illita-esmectita pueden ser tanto heredadas como resultado de la transformación edafogénica de illita.

4.1.3- Propiedades químicas

En la Tabla 9 se presentan algunos parámetros químicos de la situación inicial del lugar donde se realizó el ensayo de descompactación en el suelo de la serie Arroyo Dulce. Los datos corresponden a muestras tomadas en julio de 2000. Se observa que el tenor de materia orgánica es bajo, a causa de la larga historia agrícola de estas tierras. Por igual razón el nivel de fósforo está en una situación intermedia y el pH es levemente ácido.

Tabla 9. Propiedades químicas de la serie Arroyo Dulce en Salto al inicio del ensayo.

Propiedades	Profundidad, cm			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Materia orgánica, %	2,78	2,22	1,60	1,10
P _{asimilable} , ppm	8,1	1,1	0,7	0,3
pH, H ₂ O	5,8	5,7	5,9	6,1

Los resultados de los análisis químicos efectuados en el año 2003, a los 40 meses de iniciado el ensayo, se consignan en la Tabla 10. Se puede apreciar un ligero aumento del contenido en materia orgánica de los horizontes

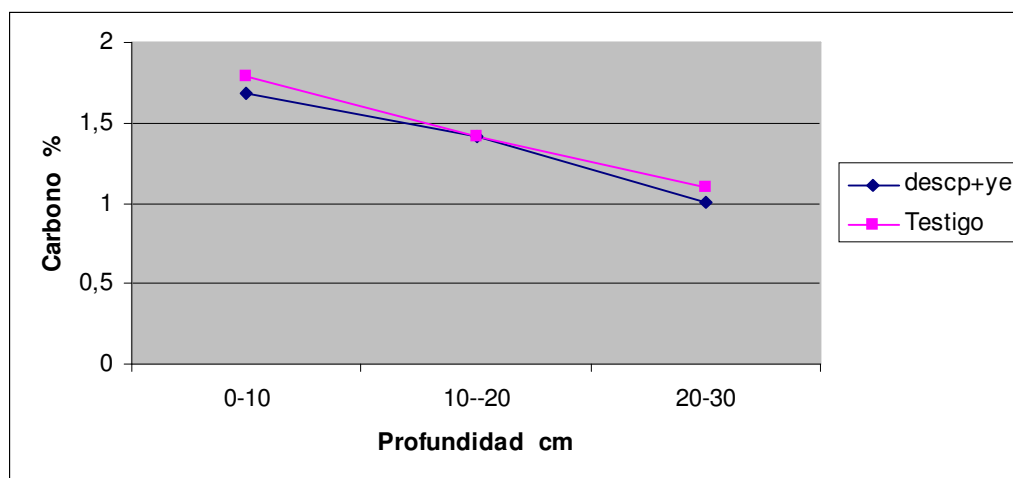
superficiales hasta una profundidad de 20 cm, la cual se produjo en todos los tratamientos. Sin embargo, no existen diferencias notables en el contenido en materia orgánica entre los distintos tratamientos (Tabla 10, Figura 13).

Tabla 10. Propiedades químicas de la serie Arroyo Dulce en Salto, a los 40 meses de iniciado el ensayo.

	Tratamiento								
	Subsolado + yeso			Subsolado			Testigo		
	Profundidad, cm								
	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30
MO, %	2,86	2,53	1,96	3,29	2,77	2,03	3,22	2,41	1,46
P_{asimilable}, ppm	22,0	5,6	2,1	8,3	3,3	ND*	7,6	4,3	3,1
CE, ds/m	0,34	0,48	0,49	0,37	0,62	0,44	0,42	0,65	0,35
pH H₂O	5,9	5,9	5,5	5,8	5,9	5,4	5,7	5,8	5,6

*ND =No determinado

Figura 13. Carbono orgánico en función de la profundidad de la serie Arroyo Dulce en Salto a los 40 meses de iniciado el ensayo.



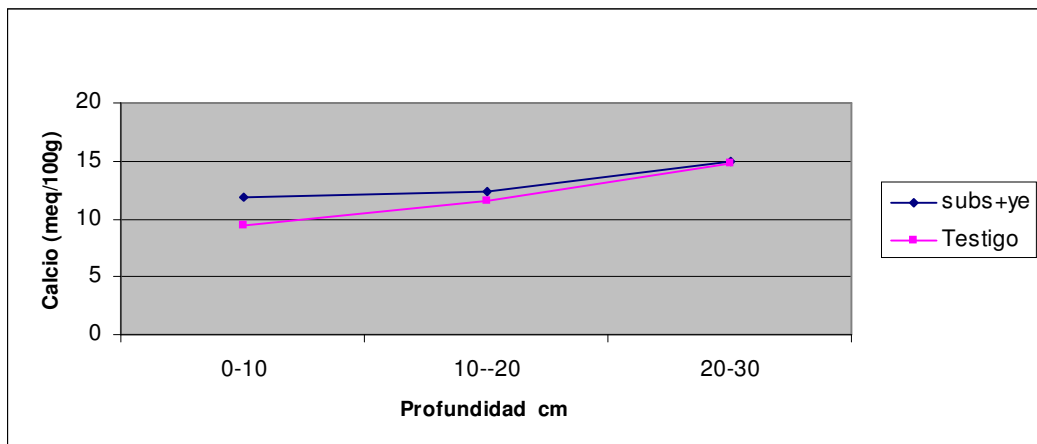
En general, en el resto de los parámetros químicos medidos luego de más de tres años de realizado el tratamiento de subsolado con enmienda profunda de yeso tampoco se observaron cambios. Esto se puede comprobar para fósforo

asimilable y pH cuando se comparan las Tablas 9 y 10.

No obstante, la cantidad de fósforo asimilable determinado a la profundidad de 0-10 cm en el tratamiento de subsolado con yeso (22,0 ppm) es mucho más elevada que en los restantes tratamientos. Tampoco varió la conductividad eléctrica tras 40 meses de duración de los ensayos.

El contenido de calcio de cambio mostró unos valores superiores en el tratamiento con enmienda de yeso que en el tratamiento testigo (Figura 14). Así, entre 0 y 10 cm de profundidad el calcio de cambio ascendió a 11,8 meq/100g de suelo con yeso frente a 9.5 meq/100g de suelo en el testigo. La diferencia se mantuvo hasta 20 cm de profundidad y se puede explicar como el resultado de la disolución del yeso, la cual libera Ca que puede reemplazar al sodio en el complejo de cambio.

Figura 14. Contenido de Calcio en función de la profundidad de la serie Arroyo Dulce en Salto a los 40 meses de iniciado el ensayo.



Los resultados de la composición elemental obtenida con la técnica de FRX se presentan en las Tablas 11 (macroelementos, Si, Al, Fe, K, Ca, N, Ti, Mg y P) y 12 (microelementos, Mn, Cu, Zn, S, Ba, Zr, Rb y Sr).

Las pérdidas por combustión que se pueden atribuir al agua residual, al

contenido en materia orgánica y a los minerales secundarios ricos en hidróxilos son relativamente constantes, oscilando entre 9,1 y 11,5%.

El contenido en SiO₂ depende del contenido en arena, siendo inversamente proporcional al contenido en Al₂O₃. En los tratamientos estudiados los contenidos de sílice y aluminio son prácticamente constantes. La excepción es la muestra tomada a 20-30 cm de profundidad en parcela testigo que presenta el mínimo de SiO₂ (57,6%) y el máximo de Al₂O₃. (16,75%). Estos resultados están de acuerdo con la composición mineralógica, en la que los minerales más abundantes son el cuarzo y los feldespatos

Las proporciones de Fe₂O₃ (4,29 a 5,67%), K₂O (2,39 a 2,52%), Na₂O (1,31 a 1,595%), CaO (2,00 a 2,13 %) y MgO (0,78 a 1,07%) no presentan oscilaciones importantes entre las diferentes profundidades y tratamientos estudiados y sus valores reflejan la composición del material parental de origen loessico.

Tabla 11. Elementos mayoritarios de la serie Arroyo Dulce en Salto, a sucesivas profundidades (Test.: testigo, Sub + y = subsolado + yeso).

	PPC	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	P ₂ O ₅
	%									
TEST. (0-10)	9.3	63.2	14.25	4.73	2.47	2.13	1.45	0.90	0.81	0.185
TEST. (10-20)	9.1	62.9	14.66	4.85	2.48	2.12	1.39	0.91	0.84	0.147
TEST. (20-30)	9.6	62.2	14.75	4.94	2.43	2.12	1.30	0.90	0.87	0.142
SUB+Y (0-10)	9.6	63.8	13.81	4.29	2.39	2.08	1.59	0.83	0.78	0.173
SUB+Y (10-20)	9.3	63.0	14.63	4.66	2.44	2.09	1.46	0.840	0.86	0.149
SUB+Y (20-30)	11.5	57.6	16.75	5.67	2.52	2.00	1.31	0.87	1.07	0.100

La serie Arroyo Dulce presenta un contenido en fósforo total relativamente bajo, como ocurre en general en los suelos derivados de materiales loessicos. El fósforo disminuye en profundidad tanto en el tratamiento testigo como en el subsolado. El mayor contenido de P₂O₅ de los horizontes superficiales pone de manifiesto el efecto de la fertilización fosfatada, que se detecta mediante FRX.

Las concentraciones de titanio y circonio son normales para suelos de la zona templada desarrollados sobre sedimentos loessicos. El contenido en ZrO₂ tiende a aumentar hacia la superficie, lo que refleja la mayor intensidad de la meteorización e incidencia de los procesos edafogenéticos.

Tabla 12. Elementos minoritarios de la serie Arroyo Dulce en Salto.

	MnO	CuO	ZnO	SO₃	BaO	ZrO₂	Rb₂O	SrO
	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	Ppm
TESTIGO (0-10)	0.126	112	152	0.121	710	420	127	420
TESTIGO (10-20)	0.127	116	157	0.107	720	417	125	417
TESTIGO (20-30)	0.121	115	160	0.113	725	408	128	408
SUB+Y (0-10)	0.117	108	148	0.121	645	474	117	401
SUB+Y (10-20)	0.124	106	146	0.101	695	449	120	402
SUB+Y (20-30)	0.113	120	171	0.081	655	433	138	385

Los contenidos de MnO, CuO, ZnO y BaO son prácticamente constantes en profundidad y no mostraron diferencias entre los tratamientos testigo y subsolado con enmienda a base de yeso.

Los suelos de la Pampa Ondulada pueden presentar deficiencias en azufre, lo que se refleja en los contenidos relativamente bajos de SO₃ detectado por FRX, que oscilan entre 0,081 y 0,121%. Se observa una tendencia a la disminución del contenido en azufre con la profundidad.

La técnica de FRX no fue suficientemente precisa como para detectar diferencias en los contenidos en calcio y azufre totales entre el tratamiento testigo y el tratamiento de subsolado profundo con enmienda de yeso, lo que está en consonancia con la naturaleza semicuantitativa del método empleado.

4.1.4- Propiedades físicas

Mediante el estudio de las propiedades físicas se pudo observar los cambios favorables producidos por la descompactación acompañada de enmienda de yeso en profundidad. Cabe mencionar que el 16 de julio del 2000 se inició el ensayo con sus dos tratamientos. Luego de sembrada la soja, en septiembre de 2000, se realizó dos chequeos, a los 7 y a los 40 meses de iniciado el ensayo.

4.1.4.1- Primer muestreo

Durante el primer muestreo de las propiedades físicas, que se realizó a los siete meses de iniciado este ensayo, las determinaciones programadas fueron las siguientes: estabilidad estructural, densidad aparente y porosidad, distribución de tamaño de poro por intrusión de Hg y superficie específica.

Los resultados para estabilidad estructural, densidad aparente y porosidad se consignan en la Tabla 13. En primer lugar, los valores de estabilidad estructural mostraron que en general la estructura es buena. Estos resultados señalan el efecto positivo de la siembra directa, efecto acumulado durante 7-8 años previos en el suelo donde se desarrollaron los ensayos. No obstante, el subsolado originó una disminución de la estabilidad estructural.

En la Tabla 13 también se comprueba que la labranza profunda con enmienda de yeso disminuyó el grado de compactación del suelo, medido en términos de densidad aparente, tanto en el suelo superficial como en el subsuperficial, entre 6.3% y el 14.2%. Asimismo, se observa que la descompactación por subsolado

junto con la enmienda incrementó 9,5 y 14,7% la porosidad total del suelo superficial entre 0-20 cm de profundidad, con respecto al suelo testigo. Sin embargo, en el tratamiento subsolado, en ausencia de enmienda de yeso, no disminuyó la densidad aparente ni aumentó la porosidad total en comparación con el tratamiento testigo.

Tabla 13. Estabilidad estructural, densidad aparente y porosidad de la serie Arroyo Dulce en Salto a los 7 meses de iniciado el ensayo.

Tratamiento	Estabilidad estructural, (mm)	Densidad aparente (g/cm ³)		Porosidad total (%)	
		Profundidad (cm)			
		0-10	10-20	0-10	10-20
Testigo	1,92	1,33	1,22	49,6	54,0
Subsolado+yeso	1,59	1,24	1,17	53,2	55,7
Subsolado	1,01	1,42	1,37	46,4	48,3

Hamilton-Manns et al., 2002, establecieron que los procesos de recuperación de la estructura en el cambio del sistema de labranza convencional a siembra directa, con estructura degradada, aparece la necesidad del subsolado para mejorar el comportamiento de los cultivos sin labranza. Esto es necesario especialmente en suelos de textura fina, sujetos a agricultura continua, como los que estudiamos en la Pampa Ondulada.

Los resultados de captación e infiltración de agua de lluvia tras siete meses de tratamiento y cultivo de soja, se presentan en la Tabla 14. La lluvia efectiva en el tratamiento Subsulado + yeso fue casi el doble de la registrada en el testigo. La descompactación acompañada de enmienda de yeso produjo un incremento considerable en la infiltración final. El subsolado, sin enmienda adicional de yeso, también aumentó la infiltración final, pero en menor proporción. Del mismo modo, la descompactación por subsolado originó un aumento de la infiltración total y media, pero este aumento fue mucho más elevado cuando el

subsulado se acompañaba de enmienda caliza. Por tanto, la captación total de lluvia fue mayor en todos los tratamientos de subsulado.

Tabla 14. Captación e infiltración del agua aplicada con microsimulador de lluvia de la serie Arroyo Dulce en Salto a los 7 meses de iniciado el ensayo.

Tratamiento	Lluvia acumulada, mm	Lluvia efectiva, %	Infiltración		
			Total, mm	Media, mm/h**	Final, mm/h***
Testigo	120	34	41,2	41,2	18
Subsolado+yeso	120	63	74,2	74,2	63
Subsolado	120	39	46,0	46,0	33

*promedio de tres repeticiones.

**total infiltrado en una hora.

***tasa de infiltración en los últimos cinco minutos de la lluvia.

La tasa de infiltración en los dos tratamientos que incluyeron subsulado fue superior a la del tratamiento testigo. Esto se resalta cuando se toma en cuenta la tasa de infiltración final. Estos datos señalan que los tratamientos captaron 33,0 y 4,3 mm más de agua que el testigo. La elevada tasa de infiltración final del tratamiento con yeso, sugiere que la infiltración se mantendrá elevada por más tiempo.

Bajo el sistema de siembra directa, se encuentra en muchas situaciones baja tasa de infiltración, como se desprende del trabajo de Sasal et al., 2004. En este estudio se comprobó que no se cumple en estos suelos la teoría según la cual bajo siembra directa hay una reducción de la macroporosidad, compensada con la presencia de bioporos de mayor efectividad para el movimiento del agua.

La mayor capacidad de infiltración encontrada en el subsulado con yeso está relacionada con la menor densidad aparente en comparación con el tratamiento testigo (Tabla 13). Este descenso en la densidad aparente está asociado con

una mayor porosidad total (Tabla 13) y especialmente la macroporosidad, que es la principal responsable del movimiento de agua en profundidad en el perfil del suelo.

La reacción del yeso con el agua de lluvia en suelos con elevado contenido de arcilla es la siguiente: las arcillas tienen carga neta negativa y se mantienen en equilibrio con los cationes de la solución. La disolución del yeso en este sistema reduce la capa difusa que rodea la arcilla por la liberación de electrolitos, reforzando la doble capa que mantiene a la arcilla floculada (Wallace et al., 2001). Así la dispersión de la arcilla se minimiza, lo que contribuye al mantenimiento de la estructura y el sistema poroso que permita la infiltración del agua de lluvia al suelo.

En la Figura 15 se puede observar una curva acumulativa de intrusión de Hg entre los diámetros equivalentes de aproximadamente 100 a 0.005 μm . En la misma gráfica también se incluye la distribución de frecuencias del mercurio intruido en cada entorno de tamaño de poro, que se obtiene como la derivada del volumen acumulativo.

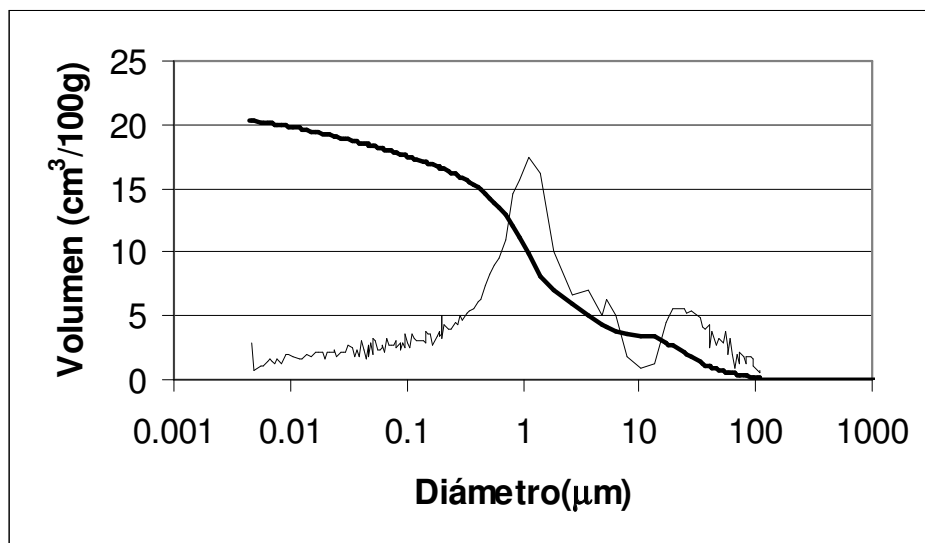
En todas las curvas de intrusión de Hg de la serie Arroyo Dulce se aprecia una distribución de frecuencias bimodal, si bien hay un claro predominio de la fase mayor de entrada de Hg. Esta fase principal de intrusión presenta un máximo en el entorno de tamaño de poro de aproximadamente 1 a 2 μm . La segunda fase o fase menor de entrada de Hg corresponde a diámetros mayores, y se localiza entre aproximadamente 100 y 10 μm , con un máximo alrededor de las 30-50 μm .

Las curvas de intrusión de Hg de la serie Arroyo Dulce presentan similitudes con las obtenidas por Fernández Rueda (1977) e Ingaramo (2003) en suelos franco-limosos y limosos de la Comunidad Autónoma de Galicia en España, en los que se reconocieron dos fases de entrada de Hg.

De acuerdo con Fiès (1984) e Ingaramo (2003) la fase de entrada de Hg inicial, entre 1000 y 10 μm representa a la porosidad estructural, un compartimento de

carácter coyuntural, ya que puede ser modificada por el laboreo y otras acciones antrópicas, así como otros factores de los que depende la estructura como el clima y la actividad de la fauna del suelo. A su vez, la fase principal de inyección de Hg con un máximo en el entorno de 1 a 2 μm de diámetro equivalente, representa la porosidad de tipo textural, que depende esencialmente de la composición granulométrica y composición orgánica y mineral de la muestra estudiada (Monnier et al., 1973).

Figura 15. Ejemplo de curva acumulativa de intrusión de Hg y de la distribución de frecuencia resultante, en función del tamaño de poro. (Testigo, 0-10 cm).



Hay que tener en cuenta que el límite superior de los poros medidos por intrusión de Hg es del orden de 100 μm , lo que supone que esta técnica no permite caracterizar a macroporos con dimensiones por encima de este límite. Dicho de otro modo, la porosidad estructural solo puede ser medida en parte por inyección de Hg.

Los resultados de distribución de tamaño de poro obtenidos por intrusión de Hg se consignan en la Tabla 15. La porosidad "total" de intrusión de Hg, es decir, la comprendida entre 100 y 0.005 μm de los seis agregados estudiados, uno por profundidad y tratamiento, oscila entre 164,49 y 201,54 $\text{cm}^3/1000 \text{ g}$. Esta

porosidad es más elevada en los agregados del nivel superficial, de 0 a 10 cm, tanto en el testigo como en el tratamiento descompactado con enmienda de yeso, lo que se puede atribuir al efecto del tenor en materia orgánica sobre el espacio poroso.

Tabla 15. Distribución de tamaño de poro en agregados individuales de los tratamientos testigo y subsolado con yeso (cm³/1000g).

Diámetro	Testigo			Subsolado con yeso		
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
100-50 μm	6,30	13,64	9,95	20,47	5,32	7,48
50-30 μm	8,02	7,81	6,60	14,19	4,19	4,49
30-10 μm	20,25	9,31	10,07	17,72	6,32	7,63
10-2 μm	29,86	17,86	36,61	33,47	14,78	9,55
2-.5 μm	78,70	79,41	51,44	73,82	74,84	85,23
.5-.2 μm	21,14	20,64	11,66	16,65	17,17	18,11
.2-.05 μm	18,12	20,01	12,07	14,95	16,31	16,09
.05-.01 μm	14,58	15,34	18,10	14,36	16,84	16,24
.01-.005 μm	4,57	3,59	7,99	5,27	4,73	4,19
Total	201,54	187,61	164,49	210,90	160,14	169,01

De acuerdo con Greenland (1977), se pueden distinguir poros de transmisión (500-50 μm), de almacenamiento (50-0.5 μm) y residuales (<0.5 μm). Por tanto, la técnica de intrusión de Hg permite caracterizar totalmente la porosidad de almacenamiento o mesoporosidad y solo en parte la porosidad de transmisión o macroporosidad. La porosidad de almacenamiento en los agregados estudiados osciló entre 99,77 y 136,83 cm³/1000 g, lo que supone

entre un 61,0 y 67,90% de la porosidad total medida por intrusión de Hg. Estos resultados también tienen interés para evaluar el agua útil, disponible para la planta entre capacidad de campo y punto de marchitez.

La superficie específica obtenida a través de los diagramas de adsorción de N₂ según el método BET se consigna en la Tabla 16. Los resultados para cada profundidad son la media de dos determinaciones. Estos resultados reflejan el contenido en arcilla y materia orgánica. La muestra tomada a 0-10 cm en el tratamiento subsolado con yeso presenta una superficie específica de un orden de magnitud que duplica al de las restantes muestras, pudiendo atribuirse este resultado a la selección de agregados ricos en materia orgánica o muy arcillosos, poco representativos del nivel estudiado. En las restantes muestras la superficie específica oscila entre 20,1 y 24,2 m²/g.

Los valores inferiores de superficie específica corresponden a la profundidad de 10-20 cm, indicando una discontinuidad de materiales en profundidad, como ya se pudo observar al analizar los datos de textura. En el nivel de 20 a 30 cm la superficie específica aumenta de nuevo.

Tabla 16. Superficie específica a sucesivas profundidades en las parcelas testigo y descompactada con yeso (m²/g).

Testigo			Subsolado con yeso		
0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
24,1	20,7	23,3	44,9	20,1	24,2

Los valores de superficie específica medidos en la serie Los Cardos son inferiores a los obtenidos en un Argiudol de Entre Ríos, de acuerdo con los datos recientemente presentados por Wilson (2007). Estos resultados se explican en buena parte por las diferencias de contenido en arcilla

4.1.4.2 – Segundo muestreo

A los 40 meses de realizada la descompactación con enmienda de yeso se realizaron las determinaciones físicas programadas, donde se midió densidad aparente, infiltración con simulador de lluvia y resistencia a la penetración.

En la Tabla 17 se puede observar la densidad aparente y la porosidad total del horizonte comprendido entre 0-10 cm de profundidad, determinadas tras 7 y 40 meses desde el inicio del tratamiento. Puede comprobarse que tras 40 meses desde la aplicación del tratamiento, el efecto positivo del subsolado en la disminución de la densidad aparente, y por tanto de la porosidad total, no desaparece totalmente, pero es menos apreciable.

Resultados similares fueron obtenidos por Buscher et al., 2000, los cuales observaron que los suelos con estructura degradada son muy susceptibles a una pronta reconsolidación, desapareciendo rápidamente el efecto del subsolado.

Tabla 17. Densidad aparente y porosidad total promedio de 0 a 10 cm, a 7 y 40 meses de iniciado el tratamiento.

Tratamiento	Densidad aparente (g/cm ³)		Porosidad total (%)	
	A 7 meses	A 40 meses	A 7 meses	A 40 meses
Subsolado+yeso	1,33	1,42	49,8	46,4
Subsolado	1,24	1,40	53,2	47,2
Testigo	1,42	1,38	46,4	47,9

La infiltración de lluvia simulada corrobora que el estado estructural del suelo bajo siembra directa con agricultura continua no funciona adecuadamente y teniendo en cuenta que en la Pampa Ondulada el sistema agrícola es de seco, los cultivos dependen exclusivamente del agua aportada por las lluvias. De ahí el interés de las medidas de infiltración y los parámetros derivados de la misma.

Entre los antecedentes, conviene mencionar el trabajo de Sasal, et al., 2005, en donde se afirma que en el sistema bajo Siembra Directa (SD) en esta región, no se produjeron los bioporos verticales originados por las raíces, ni hubo un incremento de la estabilidad estructural, como indican los antecedentes en otros lugares. En este trabajo se pudo comprobar que hubo menores tasas de infiltración en laboreos de siembra directa que en labranza convencional.

Tabla 18. Infiltración de lluvia simulada a los 7 y 40 meses de aplicados los tratamientos.

Tratamiento	Lluvia aplicada (mm)		Lluvia efectiva (%)		Infiltración de la lluvia			
					Infiltración total (mm)		Infiltración final (mm/h)	
	Tiempo transcurrido desde tratamientos, meses							
	7	40	7	40	7	40	7	40
Subsolado+yeso	120	60	63	52,9	74,2	31,7	63	15
Subsolado	120	60	39	59,1	46,0	35,5	33	18
Testigo	120	60	34	44,1	41,2	26,5	18	12

La reconsolidación del suelo y la pérdida del efecto del subsolado se puede observar en las tasas de infiltración (Tabla 18). Si bien los datos obtenidos con las simulaciones de lluvia tras 7 meses y tras 40 meses no pueden ser comparados entre sí, debido a la diferente cantidad de lluvia aplicada en cada caso, sí pueden extraerse conclusiones de la tasa final de infiltración. Los bajos valores de los tres tratamientos, los cuales no presentan grandes diferencias entre sí, parecen indicar que el efecto del subsolado ha disminuido en términos relativos tras 40 meses de aplicado el tratamiento. Incluso el efecto positivo del yeso en el mantenimiento de la estructura del suelo no se traduce en tasas muy superiores de infiltración final en relación a las del testigo.

En términos generales, se puede afirmar que las modificaciones físicas producidas por el Subsolador al suelo, tienen también una residualidad

importante después de 40 meses de su aplicación, lo que hace suponer que sus efectos se prolongarán en el tiempo por un lapso mayor, aún no determinado.

La resistencia a la penetración medida a los 7 y 40 meses de iniciada la experiencia a seis intervalos diferentes de profundidad, ente 0 y 30 cm, se consignan en la Tabla 19. También se incluye en esta tabla la humedad medida por tramos de 10 cm.

Tabla 19. Resistencia a penetración (MPa) a 7 y 40 meses de iniciado el tratamiento.

Resistencia a la penetración (Mpa)						
Tratamiento	Subsolado+yeso		Subsolado		Testigo	
Profundidad (cm)	7 meses	40 meses	7 meses	40 meses	7 meses	40 meses
0-5	1,19	1,38	1,22	1,10	2,55	2,48
5-10	2,07	3,31	2,20	2,21	3,80	4,69
10-15	2,57	2,76	2,90	2,76	3,40	3,03
15-20	2,23	2,21	1,87	1,93	1,80	1,66
20-25	1,72	1,66	1,35	1,38	1,93	1,38
25-30	1,66	1,66	1,25	1,10	1,90	1,93
Humedad (%)						
Tratamiento	Subsolado+yeso		Subsolado		Testigo	
Profundidad (cm)	7 meses	40 meses	7 meses	40 meses	7 meses	40 meses
0-10	20	16	21	17	23	18
10-20	21	17	21	18	23	25
20-30	25	28	28	25	26	26

Los valores de resistencia a la penetración de cono, indican que el sistema de siembra directa en agricultura continua, donde el cultivo principal es soja, compacta el suelo notablemente (Tabla 19). Esto coincide con las observaciones de Sasal et al., 2005 e Imeson et al., 2004.

Quiroga et al., 1998, indica que siendo la condición física inicial del suelo que entró en siembra directa de baja agregación, la recompactación luego de descompactar, puede ocurrir rápidamente. Por lo tanto las posibilidades de producir efectos físicos favorables en el suelo, está estrechamente relacionada a la condición de degradación original.

4.1.5. – Rendimientos

El 11 de abril de 2001 se cosecharon las parcelas en las que se había sembrado soja de 1ª (temprana) separadamente, con una cosechadora de producción. El 7 de mayo de 2002 se cosechó la soja de 2º cosecha (tardía).

Tabla 20. Rendimientos de la soja en diferentes períodos.

Tratamientos	Período 2000/2001		Período 2001/2002	
	Soja de 1ª (temprana)		Soja de 2ª (tardía)	
	kg/ha	Diferencia (%)	kg/ha	Diferencia (%)
Subsolado+yeso	4200	17,6	2525	15
Subsolado	3788	6,0	2350	7
Testigo	3572	0	2200	0

El rendimiento de soja de primera (siembra temprana) durante el período 2000-2001, en el tratamiento descompactado con yeso, fue superior al testigo en 628 kg/ha lo que representa un incremento del 17,6%. En el tratamiento descompactado el aumento de la producción fue de 216 kg/ha, o sea del 6% con respecto al testigo (Tabla 20).

A dos años de realizado los tratamientos, los mejores rendimientos con soja de segunda (siembra tardía), durante el período 2001-2002, se obtuvieron

nuevamente en el tratamiento de subsolado con yeso (Tabla 20). Las diferencias en porcentaje durante este período son similares a las obtenidas con soja de primera en los distintos tratamientos.

En octubre del año 2003, a 40 meses de iniciado el tratamiento, se repitieron las determinaciones de campo y se encontraron diferencias entre los tratamientos.

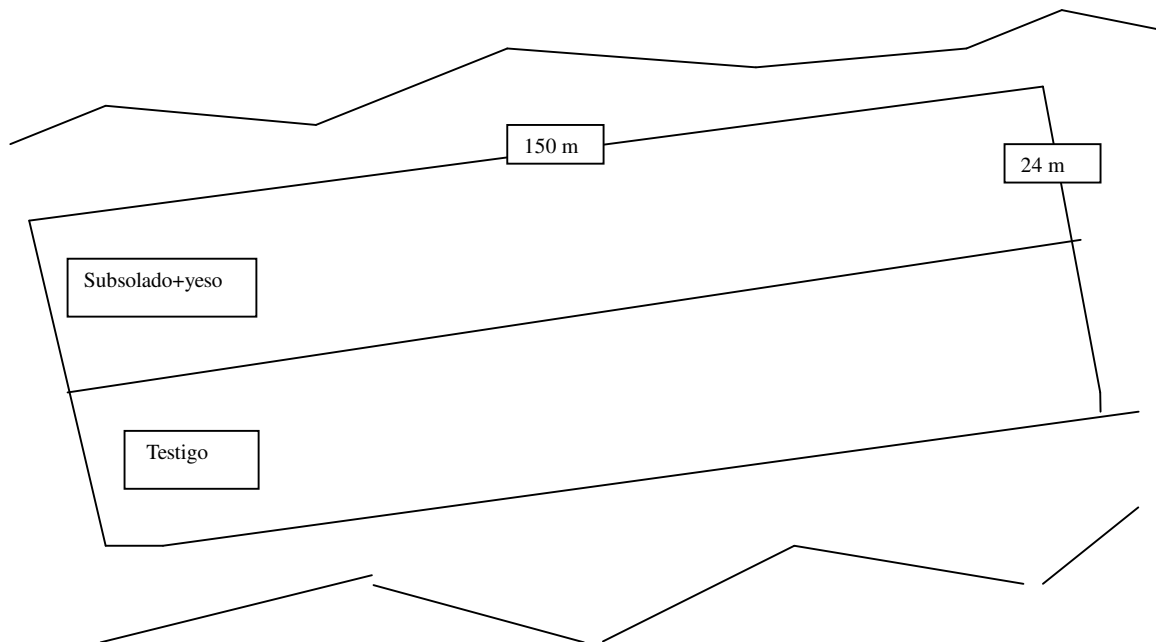
Este aumento de producción del suelo descompactado es un parámetro integrador, ya que en el mismo intervienen varios factores: refleja que hubo una mayor eficiencia en el aprovechamiento del agua de lluvia; que haya infiltrado más agua de lluvia en el suelo descompactado, significa que en el suelo tratado hubo una mejor estructura, consecuentemente una mayor macroporosidad, que permitió un mayor aporte de agua a las raíces de las plantas. A su vez las raíces del cultivo han podido explorar el espesor de suelo con agua disponible. Descompactar en profundidad sin modificar la cobertura superficial, según Unger, 1993, es una medida conveniente para la conservación del agua y una mejor distribución de raíces en el perfil.

Se debe tener en cuenta, de acuerdo a Martínez y Cordone, 2000, que en el área de agricultura continua donde este trabajo está desarrollado se ha detectado déficit de azufre en ciertos suelos. Por tanto, el aumento de los rendimientos de soja en el tratamiento de subsolado con yeso puede ser debido al efecto del mejoramiento de la estructura del suelo, lo que permite tanto una mayor disponibilidad de agua para las plantas, como una mayor disponibilidad del ión sulfato

4.2- Serie ARROYO DULCE: segundo ensayo en El Alba (Salto)

Para tratar de demostrar que los resultados de descompactación con la aplicación simultánea de yeso en profundidad serían repetibles, en 2004 se realizó otro ensayo en el mismo predio del ensayo de 2001, en la serie Arroyo Dulce, dirigido exclusivamente a comparar el subsolado con enmienda de yeso versus el suelo testigo.

Figura 16. Diseño del segundo ensayo de campo de la serie Arroyo Dulce en El Alba (Salto).



El ensayo se realizó en un campo con pendiente de 2%, muy erosionado, con un horizonte superficial de 10 cm de espesor. Con las labranzas sucesivas en la prolongada historia de labranza con arado de rejas y rastras, la capa arable en este predio era una mezcla del horizonte A con el B2t.

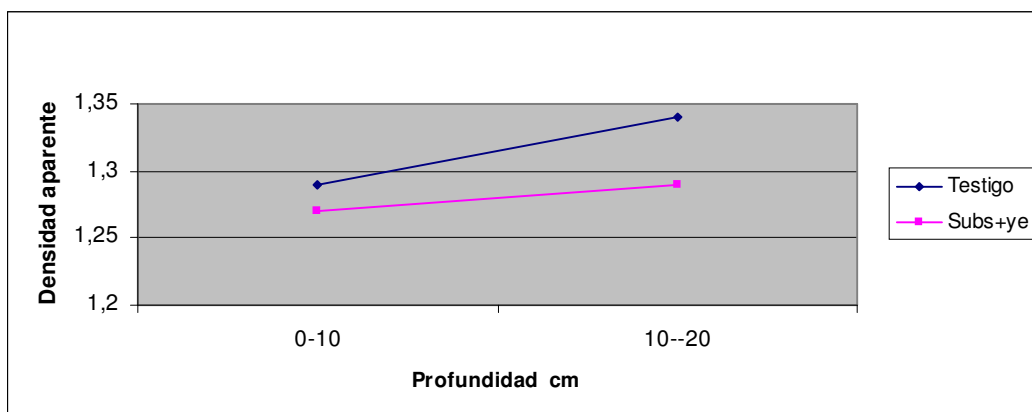
Se plantearon cuatro parcelas de 24 m de ancho por 150 m de largo, según el

esquema de la Figura 16. En los dos tratamientos se efectuaron determinaciones de las siguientes propiedades físicas: densidad aparente, tasa de infiltración, resistencia a la penetración y curvas de retención de agua. También se midió el rendimiento del cultivo.

4.2.1- Propiedades físicas

Las propiedades físicas de las parcelas ubicadas en El Alba se midieron pasados 12 meses desde el inicio del ensayo. La densidad aparente disminuyó en el tratamiento Subsulado + yeso a las dos profundidades estudiadas. Entre 0 y 10 cm este parámetro descendió de 1,29 a 1,27 g/cm³ y entre 10 y 20 cm la disminución fue menor, pasando de 1,34 a 1,29 cm³/g.(Fig.17).

Figura 17. Densidad aparente en función de la profundidad de la serie Arroyo Dulce en El Alba.

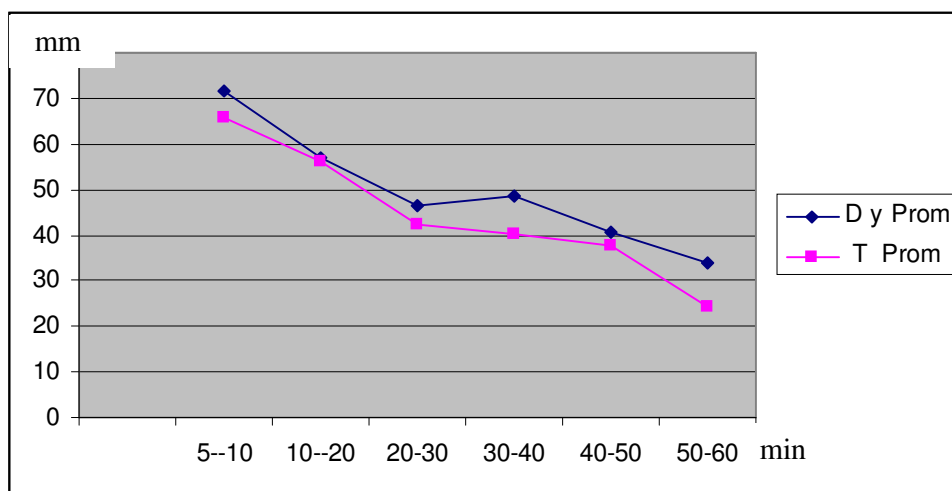


Los resultados obtenidos en El Alba son diferentes de los reportados por Hamilton-Manns et al., 2002, en el subsulado con enmienda de yeso profunda, a 24 meses de iniciado el ensayo, en un suelo franco limoso, con estructura degradada, quienes observaron que los parámetros se mantuvieron por encima de los valores del testigo.

La Figura 18 y la Tabla 21 contienen los datos de infiltración determinados a intervalos de 10 cm en el ensayo de El Alba hasta los 60 cm de profundidad. La

tasa de infiltración se mantuvo por encima de la del testigo a lo largo de 60 minutos de ensayo con simulador de lluvia. La tasa de infiltración disminuye con el tiempo tanto en el tratamiento testigo como en el tratamiento Subsulado + yeso. Sin embargo la disminución no es lineal en ninguno de los dos casos, de modo que entre 20 y 30 minutos el valor de este parámetro es relativamente constante.

Figura 18. Tasa de Infiltración de la serie Arroyo Dulce en El Alba, en función del tiempo.



Las diferencias entre el tratamiento Subsulado + yeso y testigo se apreciaron en todos los intervalos medidos, pero la importancia de las mismas es variable. Entre 30 y 40 minutos las diferencias ascienden a 8,2 mm/h y entre 50 y 60 minutos alcanzan 9,4 mm/h. También son importantes las diferencias entre 0 y 10 minutos que se cifran en 5,7 mm/h. Las menores diferencias de tasa de infiltración se observaron entre 10 y 20 minutos y entre 30 y 40 minutos, con valores de 0,7 mm/h y 3,2 mm/h, respectivamente.

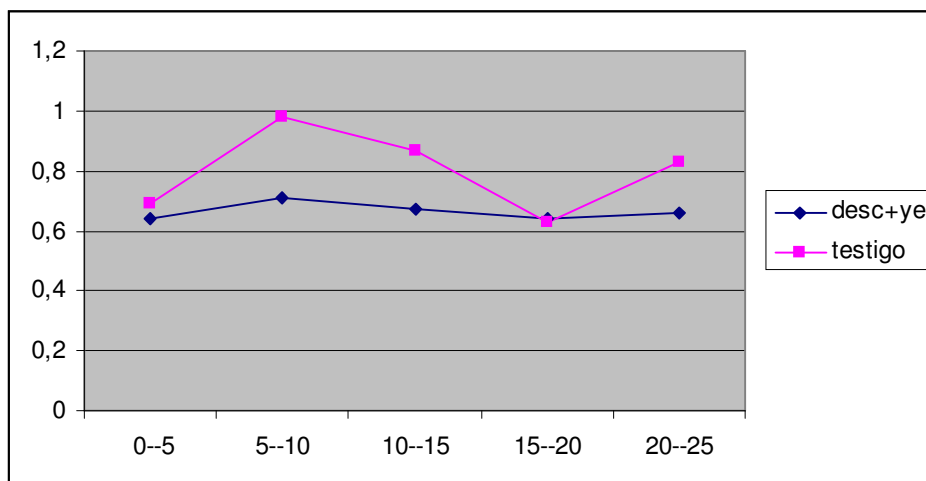
La tasa de infiltración es un parámetro que integra el estado estructural del suelo, y por lo tanto debe resaltarse por su importancia. En este sentido, conviene señalar que es el interés principal de este trabajo, inducir por todos los medios el mejoramiento de la infiltración del agua de lluvia, que es la única fuente en la agricultura de secano de nuestra región.

Tabla 21. Tasa de Infiltración de la serie Arroyo Dulce en El Alba, en función de la profundidad.

Profundidad cm	Subs+ yeso mm/h	Testigo mm/h
5—10	71,5	65,8
10—20	57,0	56,3
20-30	46,4	42,3
30-40	48,4	40,2
40-50	40,8	37,5
50-60	33,8	24,5

La Figura 19 y la Tabla 22 contienen los datos de resistencia a la penetración medidos a intervalos de 5 cm en el ensayo de El Alba hasta los 25 cm de profundidad.

Figura 19. Resistencia a penetración Mpa.



Los valores de resistencia a la penetración fueron mayores en las parcelas testigo que en el tratamiento subsolado con aplicación de yeso a todas las profundidades estudiadas, excepto en el nivel de 15 a 20 cm, en donde son muy similares. No obstante, la resistencia a la penetración durante este chequeo se mantuvo relativamente baja, no superando el umbral de 1,0 MPa en

los dos tratamientos estudiados.

En el testigo la resistencia a la penetración presentó pequeñas oscilaciones en función de la profundidad, variando entre 0,64 y 0,71 MPa. Por el contrario, en el tratamiento que fue subsolado y al que se aplicó yeso, la resistencia a la penetración en función de la profundidad no fue tan homogénea durante este chequeo, oscilando entre 0,63 y 0,98 MPa, con el valor máximo registrado a la profundidad de 10-15 cm.

En este segundo ensayo de El Alba, los valores de resistencia a la penetración de los dos tratamientos estudiados son inferiores a los del primero. Una similitud entre ambas series de datos es que en el testigo el máximo de resistencia a la penetración se mide en el nivel de 10 a 15 cm, aunque el estado de compactación en las dos ubicaciones sea diferente.

Tabla 22. Resistencia a la penetración de la serie Arroyo Dulce en El Alba, en función de la profundidad.

Profundidad cm	Subs+ yeso MPa	Testigo Mpa
0—5	0,64	0,69
5—10	0,71	0,98
10—15	0,67	0,87
15—20	0,64	0,63
20—25	0,66	0,83

En términos relativos, la resistencia a penetración entre 5-15 cm fue 25% menor en el tratamiento descompactado por subsolado y con aplicación de yeso, (Figura 18 y Tabla 22).

La retención hídrica del suelo se midió a saturación y a los potenciales de 0.03, 0.06, 0.1 y 0.3 atmósferas. Los resultados se presentan en las Figuras 20 a 24. Los datos obtenidos por esta técnica son representativos de un suelo húmedo

en condiciones próximas a saturación, contrariamente a los derivados de la porosimetría por intrusión de Hg, que se miden con el suelo seco y a potenciales hídricos más elevados o radio de poro menor. Por ello la porosimetría de inyección de Hg y las curvas de retención hídrica se pueden considerar como técnicas complementarias.

En los niveles de 0-10 cm y 10-20 cm, y para un potencial determinado el contenido hídrico medido en el tratamiento descompactado es mayor que el que corresponde al testigo: las diferencias son mayores a saturación y se van atenuando conforme aumenta el potencial.

En el nivel de 20 a 30 cm esta relación se observa a saturación y potenciales más próximos a ella, si bien las diferencias son menores.

Así, entre 0 y 10 cm el contenido hídrico a saturación es un 3,8% más elevado en las parcelas descompactadas, mientras que a 0,3 atmósferas la diferencia se reduce a 1,8%. Por el contrario, entre 20 y 30 cm las diferencias son solamente de 2,4% a saturación y de 0,6% a 0,3 atmósferas de potencial.

Figura 20. Retención de humedad en saturación.

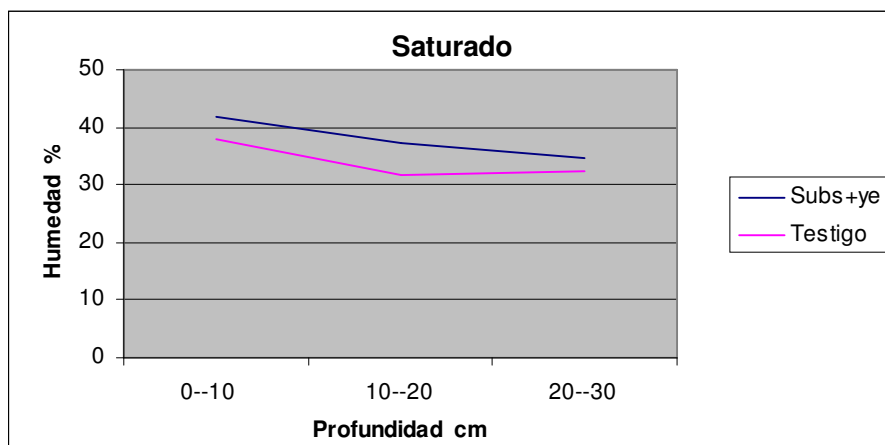


Figura 21. Retención de humedad a 0,03 atm.

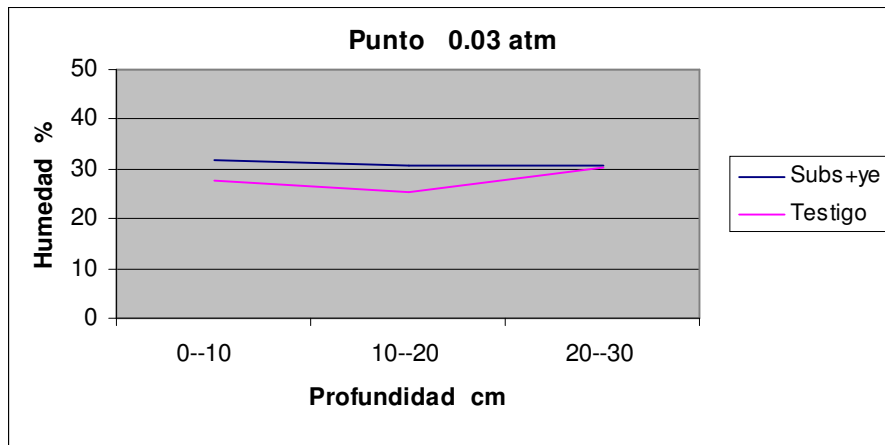


Figura 22. Retención de humedad a 0,06 atmósferas

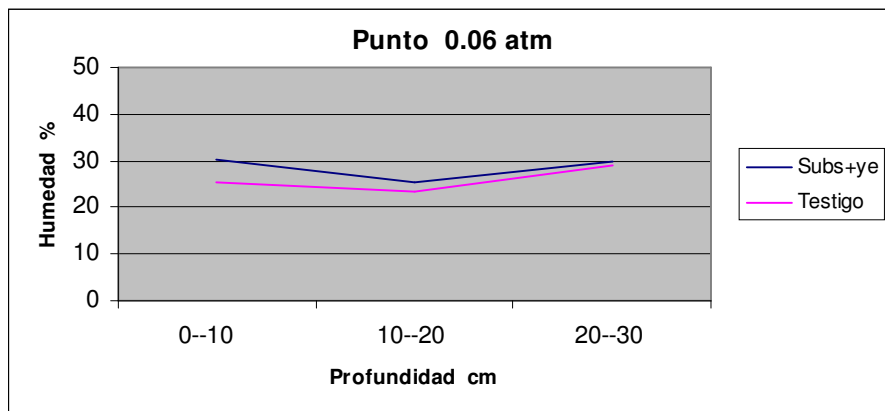


Figura 23. Retención de humedad a 0.1 atmósferas

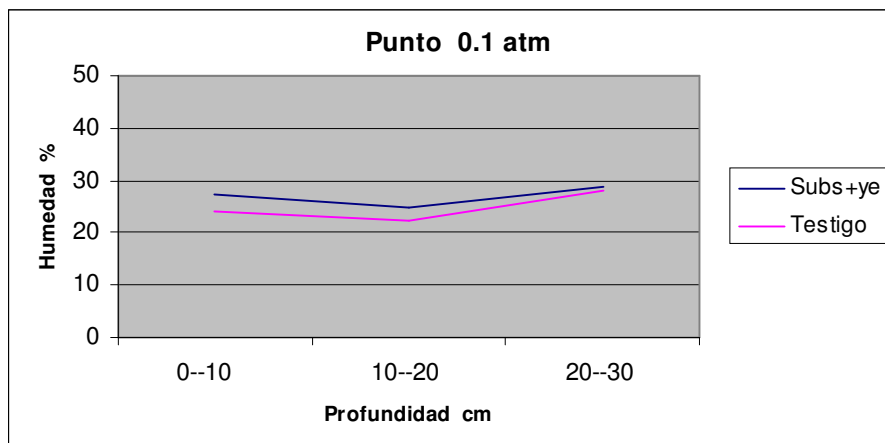
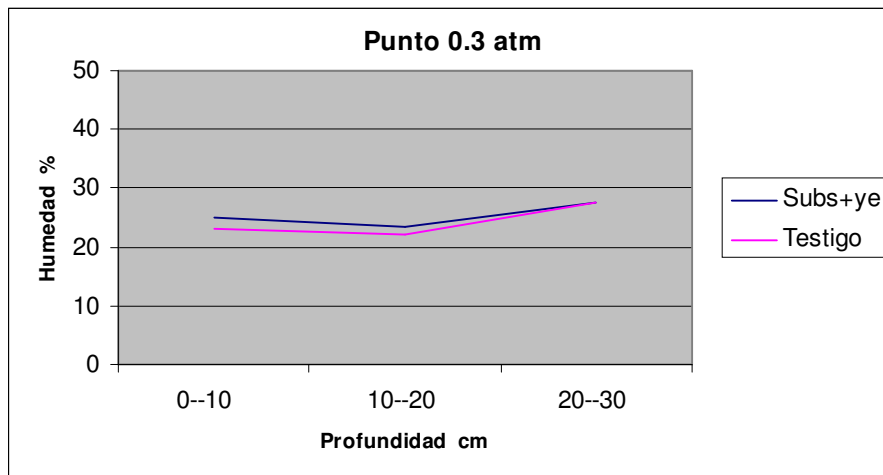


Figura 24. Retención de humedad a 0.3 atmósferas



En las Figuras 20 a 24, con una escala vertical idéntica también se aprecia como va disminuyendo el contenido hídrico entre saturación y 0,3 atmósferas tanto en el testigo como en el tratamiento subsolado con yeso a las tres profundidades estudiadas.

Para el nivel de 0 a 10 cm, el contenido hídrico entre saturación y 0,3 atmósferas disminuye desde 41,8% hasta 25% para el subsolado con yeso, mientras que en el testigo lo hace desde 38% hasta 23,2%. La diferencia asciende a 16,8% en el primer caso y a 14,8% en el segundo, lo que pone de manifiesto un mayor incremento de la macroporosidad por medio de la descompactación profunda.

En el nivel entre 10 y 20 cm, y para los mismos potenciales, las diferencias de contenido hídrico entre saturación y 0,3 atmósferas son de 13,9% y 9,7% para los tratamientos subsolado con yeso y testigo, respectivamente.

Por último, entre 20 y 30 cm las diferencias son de 7,1% y 4,5% para los tratamientos subsolado y descompactado, respectivamente.

Los anteriores resultados ponen de manifiesto el efecto del incremento en el contenido de materia orgánica sobre la macroporosidad, de modo que a un incremento de la primera le corresponde un mayor volumen de macroporos. Los resultados de este trabajo están de acuerdo con los resultados encontrados previamente por otros autores, como Hamblin (1977), Guerif (1987) y Paz y Guerif (1993).

En síntesis, en las Tablas y las Figuras de 19 a 23 se observa que los valores de contenido hídrico retenido en el suelo sometido al tratamiento subsolado + yeso, se mantienen por encima de los respectivos valores retenidos en el suelo testigo. Esto indica que en el suelo subsolado y tratado con yeso hay poros grandes y medios en mayor proporción que en el testigo.

Hasta 0,3 m se mantuvo una diferencia favorable a la práctica del descompactado con yeso, lo que está de acuerdo a los resultados presentados por Twomlow et al., 1994, en cuya experiencia se comprobó que se mantuvo 24 meses sin retornar a la situación original de macroporosidad. Por tanto los datos de porosidad apoyan los resultados previos referidos a la entrada de agua de lluvia en el perfil.

De lo anterior se puede concluir que las curvas de retención hídrica también indican una tendencia favorable con respecto al testigo, lo que corrobora que el subsolado con enmienda de yeso en profundidad produjo una descompactación que se reflejó a los 24 meses de aplicada.

4.2.2- Rendimientos

A 24 meses de iniciado este ensayo se mantuvo una diferencia a favor del subsolado con yeso, en una temporada que fue favorable para el cultivo, ya que no faltó humedad durante la misma, como se puede observar en la Tabla 23. Las diferencias fueron de 82 kg/ha y en términos relativos suponen un 2,3% de las obtenidas en las parcelas testigo.

Tabla 23. Rendimiento de soja de primera en 2006/07.

Tratamientos	Rendimiento (kg/ha)	Diferencia (kg/ha)	Diferencia (%)
Subsolado+yeso	3520	82	2,3
Testigo	3438	-	-

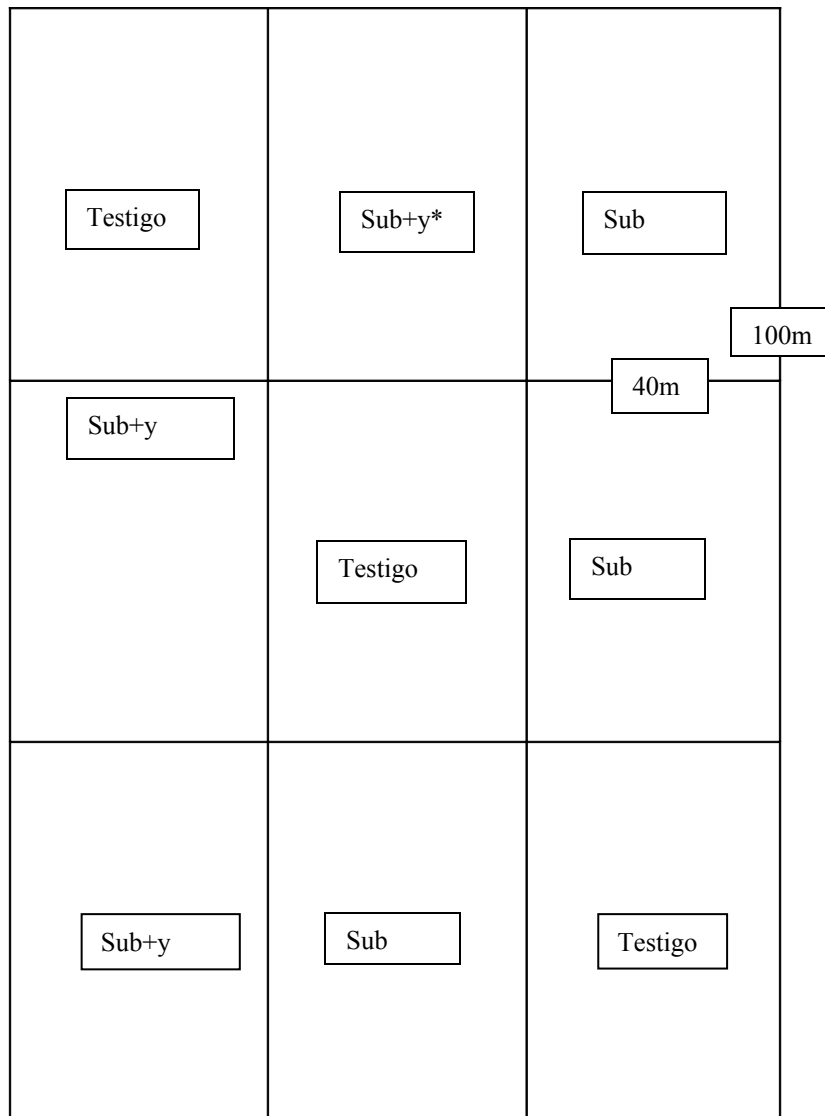
Aquí se observaron resultados que cabe atribuir al aumento de la entrada del agua de lluvia al perfil, de acuerdo con Raper, 2006. De este modo, al mejorar la macroporosidad, disminuye el escurrimiento superficial en campos en pendiente y por lo tanto el cultivo recibe mayor cantidad de agua.

Shanmuganathan y Oades, 1983, concluyeron también que el yeso en pequeña proporción (2%), en suelos arcillosos, mejoró la germinación y el rendimiento total de materia seca en forma significativa.

4.3.- Serie LOS CARDOS: ensayo en La Peti, Bouquet

El ensayo se inició en septiembre de 2001. Se plantearon nueve parcelas de 40 m de ancho por 100 m de largo, en las que se compararon tres tratamientos con tres repeticiones cada uno (Figura 25).

Figura 25. Diseño del ensayo de campo de la serie Los Cardos en La Peti (Bouquet).



Sub= Subsulado Sub+y =Subsulado + yeso.

Uno de los tratamientos se dejó como testigo, el segundo tratamiento consistió en una descompactación a 35 cm de profundidad y el tercer tratamiento consistió en una descompactación y una enmienda de yeso.

4.3.1.- Textura

Se efectuaron análisis de textura al inicio de la experiencia por horizontes genéticos, pudiéndose observar los resultados en la Tabla 24 para los horizontes A, B2t y C. Se comprueba, en primer lugar el elevado contenido de limo que caracteriza a este suelo, que junto a la presencia de arenas finas y la ausencia total de arenas gruesas lo hacen muy susceptible a la compactación inducida por el tránsito de maquinaria agrícola

Tabla 24. Textura del suelo de la serie Los Cardos en La Peti (Bouquet).

Fracción, μm	Los Cardos en La Peti (Bouquet)		
	A	B2t	C
Arcilla <2	25,1	32,1	19,3
Limo 2-50	68,9	62,7	71,2
Arena 50-100	5,4	4,7	8,7
Arena 100-250	0,6	0,5	0,8
Arena 250-500	0,0	0,0	0,0
Arena 500-1000	0,0	0,0	0,0

El contenido en arcilla del horizonte A es ligeramente superior en la serie Los Cardos cuando se compara con la serie Arroyo Dulce. Por el contrario el contenido en arcilla del horizonte B2t es sensiblemente inferior en Los Cardos (32,1%) cuando se compara con Arroyo Dulce. El horizonte C presenta idéntico contenido de arcilla en Los Cardos y Arroyo Dulce. Los tres horizontes de Los Cardos presentan un menor contenido en arena y un mayor contenido en limo que los respectivos horizontes de Arroyo Dulce.

Al igual que en la serie Arroyo Dulce, los resultados de la serie Los Cardos ponen de manifiesto la presencia de una discontinuidad textural. El contenido en arcilla aumenta de 25,1% en el horizonte A hasta 32,1% en el horizonte B2t,

para disminuir hasta 19,3% en el horizonte C. Los horizontes A y B2t presentan textura franco-arcillo-limosa y el horizonte C es de textura franco-limosa.

4.3.2.- Mineralogía de las arcillas

Al igual que en Arroyo Dulce, las muestras para análisis de la mineralogía de las arcillas de la serie Los Cardos se tomaron a las profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm. A continuación se presenta un resumen de la interpretación de los diagramas de rayos X de las muestras de arcilla de la serie Los Cardos:

0-10 cm

Minerales de arcilla: Illita bien cristalizada, predominante, acompañada por una proporción pequeña de caolinita.

Minerales accesorios: cuarzo, feldespatos.

10-20 cm

Minerales de arcilla: Illita predominante, interestratificados irregulares illita-esmectita y caolinita en proporciones pequeñas y equivalentes.

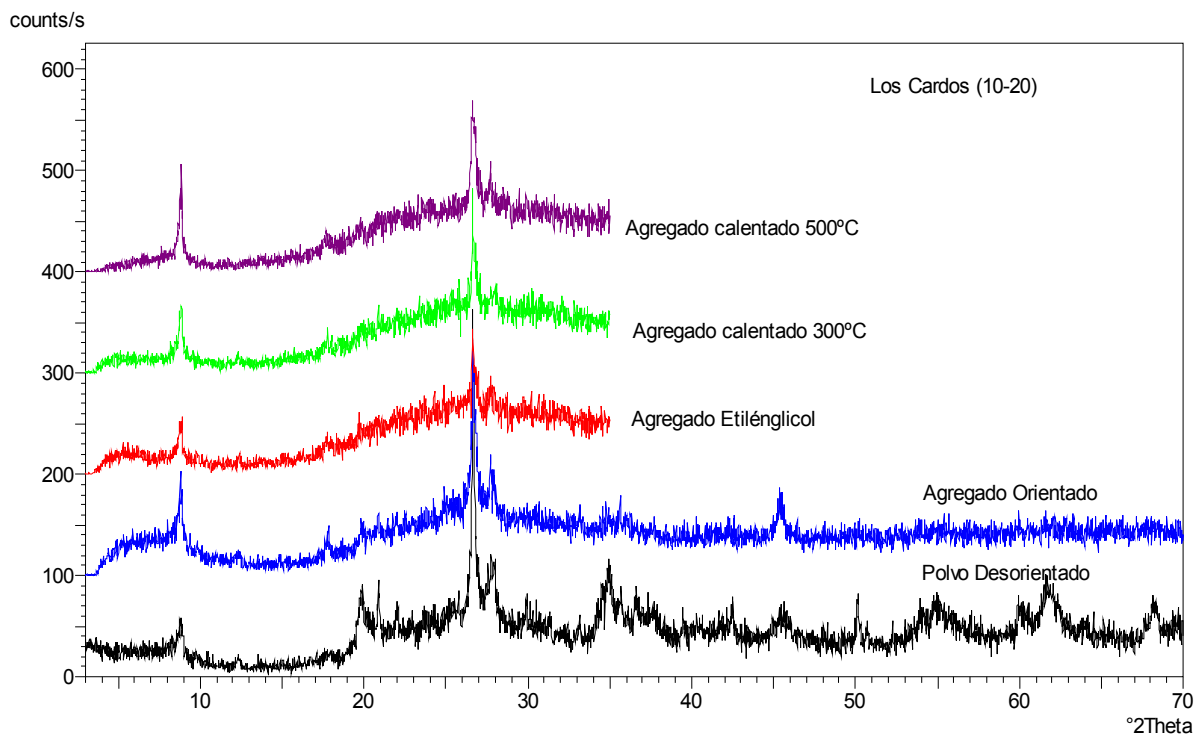
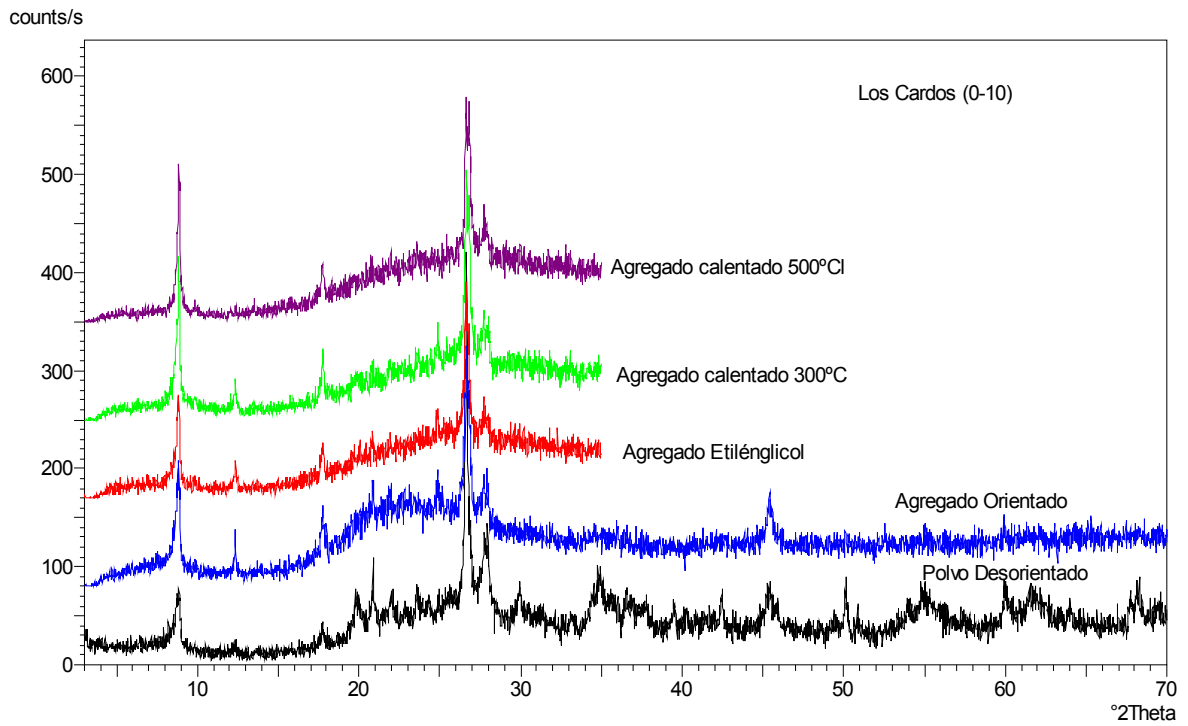
Minerales accesorios: cuarzo, feldespatos.

20-30 cm

La composición es similar a la muestra 0-10 cm.

En la serie Los Cardos, al igual que en la serie Arroyo Dulce, el mineral predominante es, sin duda, la illita. Los interestratificados illita-esmectita están ausentes del nivel comprendido entre 0 y 10 cm de la serie Los Cardos, lo que contrasta con lo que ocurre en la serie Arroyo Dulce. En las dos series, no obstante, estos interestratificados son más abundantes entre 10 y 20 cm. Por otra parte las dos series tienen pequeñas cantidades de caolinita de 0 a 30 cm

Figura 26. Difractogramas de la fracción arcilla de la serie Los Cardos en La Peti (Bouquet) a 0-10 cm y 10-20 cm.



Habitualmente se considera que los sedimentos loésicos que constituyen el material parental de los suelos pampeanos son homogéneos desde el punto de vista mineralógico, en particular en lo que se refiere a la composición de su fracción arcilla. Sin embargo contribuciones recientes a escalas diversas y siguiendo una perspectiva diferente, muestran un panorama bastante más complejo tanto para el conjunto de la región como en particular para la Pampa Ondulada. Los análisis efectuados en el marco de este trabajo muestran la diversidad de la composición mineralógica en áreas en donde la illita es, sin duda, el mineral predominante.

4.3.3.- Propiedades químicas

Las propiedades químicas se determinaron durante el primer año del ensayo, en el mes de junio del año 2002, así como tras dos años de iniciado el ensayo, en el mes de septiembre del año 2003.

4.3.3.1.- Primer muestreo

Dicho muestreo se efectuó en junio de 2002, poco antes de que finalizase el primer año de ensayo. Se llevaron a cabo determinaciones de materia orgánica, fósforo asimilable, conductividad eléctrica, pH en agua, calcio, magnesio, sodio y potasio de cambio. Los resultados se presentan en la Tabla 25.

El principal resultado que se observa en la Tabla 25 estriba en que a un año de tratado el suelo, no se han producido diferencias en los parámetros químicos considerados. Incluso el calcio no muestra un cambio entre el suelo descompactado con yeso con respecto al testigo.

La materia orgánica y el fósforo asimilable, presentan tenores más elevados a la profundidad de 0 a 10 cm que a la profundidad de 10 a 20 cm. El tenor en materia orgánica entre 0 y 20 cm oscila en la serie Los Cardos entre 1,98 y 3,02%, siendo muy similar al obtenido para la serie Arroyo Dulce. El fósforo

asimilable de la serie Los Cardos oscila entre 8,6 y 16,9 mg/Kg, siendo más elevado.

Tabla 25. Propiedades químicas de la serie Los Cardos en Bouquet a los 9 meses de iniciado el ensayo.

Propiedades	Subsolado + yeso			Subsolado		Testigo	
	Profundidad, cm						
	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	0-10	10-20
Materia orgánica, %	2,21	2,05	ND*	3,02	2,05	2,76	1,98
P_{asimilable}, ppm	12,5	11,3	ND	16,9	12,7	15,3	8,6
CE, mS/cm	0,25	0,17	0,32	0,2	0,32	0,22	0,31
pH, H₂O	6,3	6,0	6,0	6,5	6,0	6,2	6,1
Ca, meq/100 g	10,5	10	12,9	9,8	9,5	11,5	11,1
Mg, meq/100 g	2,4	2,3	3,3	2,7	2,5	2,7	2,8
Na, meq/100 g	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	0,8	0,9
K, meq/100 g	1,1	0,7	1,2	1,6	1,0	1,2	1,0

*ND= No determinado.

Según el nivel de conductividad eléctrica el suelo de la serie Los Cardos oscila entre normal y ligeramente salino, considerando el límite entre ambas categorías en 0,2 mS/cm. La conductividad eléctrica del tratamiento testigo disminuye al comparar las profundidades de 0-10 cm con la de 0-20 cm, mientras que en los tratamientos con subsolado aumenta entre estas dos profundidades. El pH en agua oscila entre 6 y 6,5, con una tendencia a disminuir levemente en profundidad. En consecuencia se trata de un suelo ligeramente ácido.

El tenor de calcio de cambio es homogéneo, oscilando entre 9,5 y 12,9 meq/100 g de suelo. También es homogéneo el tenor de magnesio de cambio que oscila entre 2,3 y 3,3 meq/100 g de suelo. El tenor de sodio de cambio oscila entre 0,9 y 1,1 meq/100 g de suelo, lo que está de acuerdo con la naturaleza ligeramente salina del suelo estudiado. Los valores de potasio de cambio, que fluctúan entre 0,7 y 1,6 meq/100 g, son bastante similares a los de sodio de cambio.

Para observar la distribución del yeso en el perfil, aplicado al subsolar el suelo compacto, se analizó la distribución de azufre a diferentes profundidades en las parcelas testigo y subsolado con yeso. Un suelo se considera bien provisto de fósforo cuando su tenor es igual o superior a 10 ppm. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26. Distribución en profundidad del contenido en azufre en las parcelas testigo y subsolado con yeso de la serie Los Cardos en Bouquet a los 9 meses de iniciado el ensayo.

Profundidad, cm	Azufre, ppm	
	Subsolado+yeso	Testigo
0-10	9,3	6,0
10-20	58,0	5,9
20-30	10,5	4,8
30-40	11,1	4,1
40-50	11,1	6,1

Suelo bien provisto en S: > 10 ppm

Se observó que el yeso que fue aplicado a una profundidad entre 0-35cm, se movilizó por lo menos hasta los 50 cm estudiados, manteniendo un nivel adecuado de azufre a esa profundidad, comparando con el tenor de azufre medido en el testigo a los 9 meses de tratado el suelo. Se comprueba que el tenor de azufre en el tratamiento testigo es inferior al umbral de 10 ppm en los sucesivos niveles hasta la profundidad de 50 cm. Por el contrario, los tenores en el tratamiento subsolado con yeso oscilan entre 9,3 ppm, a la profundidad de 0 a 10 cm y 58,0 ppm, a la profundidad de 10 a 20 ppm. Richards et al., 1995, midieron mayor concentración de ión calcáreo cerca de la línea de la cuchilla del subsolador.

En este trabajo no se midió discriminando esa distancia, pero en el cultivo de soja, se observó una uniformidad de altura y color del cultivo notables y con una diferencia significativa respecto del testigo, con lo que se podría afirmar que el yeso se movilizó horizontalmente entre las líneas de aplicación (Alcordero y Rechcigl, 1993), distanciadas 0,70m.

Por tanto, hay que considerar que el yeso aparte de ser un mejorador de la estructura es una fuente importante de azufre, elemento que empieza a ser deficitario en los suelos agrícolas de la región. El agregado de yeso soluble al suelo, en franjas separadas 70 cm, proporciona una cantidad importante de azufre y calcio a una profundidad muy apropiada para la captación de esos nutrientes por las raíces. El yeso así agregado al suelo, constituye una gran reserva de esos nutrientes, que puede ser utilizada en las cosechas futuras.

Es necesario tener en cuenta que la dosis de yeso ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de 500 kg/ha representa una aplicación de 85 Kg/ha de azufre y 115 Kg/ha de calcio, fácilmente asimilable por las plantas. La enmienda de yeso supone una dosis de azufre y calcio solubles importante a la profundidad justa de las raíces de los cultivos, y tuvo una buena respuesta en el crecimiento, desarrollo y en los parámetros morfológicos del cultivo. Luego de 40 meses se miden efectos físicos y químicos positivos de la enmienda a base de yeso.

4.3.3.2.- Segundo muestreo

El segundo muestreo se efectuó en septiembre de 2003, por lo tanto, a los dos años de iniciado el ensayo. Se llevaron a cabo determinaciones de las siguientes propiedades químicas generales: materia orgánica y carbono orgánico, nitrógeno, relación carbono/nitrógeno, conductividad eléctrica y pH en agua y en cloruro potásico en dos tratamientos: testigo y subsolado con yeso. Adicionalmente se determinaron los elementos mayoritarios y minoritarios por Fluorescencia de Rayos X.

Los resultados de los análisis químicos de las propiedades generales se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27. Propiedades químicas de la serie Los Cardos en Bouquet a los 24 meses de iniciado el ensayo.

Propiedades	Subsolado+yeso			Testigo		
	Profundidad, cm					
	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30
Materia orgánica, %	3,3	2,33	1,74	3,12	2,39	1,57
Carbono orgánico, %	1,91	1,35	1,01	1,81	1,38	0,91
Nitrógeno, %	0,17	0,13	0,1	0,16	0,13	0,09
Relación C/N, %	10,9	10,4	10,0	10,9	10,4	10,1
CE, mS/cm	0,12	0,06	0,12	0,07	0,07	0,16
Mg, meq/100 g	5,57	5,34	5,89	5,47	5,65	5,99
Na, meq/100 g	4,77	4,32	4,64	4,63	4,72	4,91

Tras 24 meses de iniciado el ensayo, no se han observado diferencias en los parámetros medidos entre tratamientos. Tan solo se observa un tenor ligeramente mayor de materia orgánica a una profundidad entre 0-10 cm en el tratamiento de subsolado con enmienda de yeso comparado con el tratamiento testigo. Estos resultados son los esperados, pues no se habían encontrado diferencias en el primer muestreo.

Los resultados de la composición elemental obtenida con la técnica de FRX se presentan en las Tablas 28 (macroelementos, Si, Al, Fe, K, Ca, N, Ti, Mg y P) y 29 (microelementos, Mn, Cu, Zn, S, Ba, Zr, Rb y Sr).

Las pérdidas por combustión en la serie Los Cardos oscilaron entre 7,8 y 10,3 %. Estas pérdidas se pueden atribuir al agua residual, al contenido en materia orgánica y a los minerales secundarios ricos en hidroxilos son relativamente constantes y similares a las de la serie Arroyo Dulce, si bien algo inferiores.

Tabla 28. Elementos mayoritarios de la serie Los Cardos en Bouquet a sucesivas profundidades.

	PPC	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	P ₂ O ₅
	%									
TEST (0-10)	9.5	65.9	12.39	3.92	2.54	1.73	1.61	0.82	0.803	0.226
TEST (10-20)	8.8	66.5	12.50	4.01	2.54	1.65	1.63	0.83	0.792	0.215
TEST (20-30)	7.8	66.8	12.97	4.10	2.61	1.69	1.76	0.86	0.834	0.174
SUB+Y (0-10)	9.2	66.2	12.38	3.88	2.55	1.71	1.63	0.81	0.803	0.222
SUB+Y (10-20)	8.2	66.9	12.55	4.03	2.56	1.64	1.63	0.83	0.803	0.194
SUB+Y (20-30)	10.3	60.6	15.50	5.29	2.77	1.63	1.39	0.85	1.125	0.148

Test.: testigo, **Sub+y:** subsolado + yeso

En las muestras estudiadas, el contenido en SiO₂ osciló entre 65,9 y 66,9 %, excepto a la profundidad de 20 a 30 cm en el tratamiento subsolado con yeso donde el tenor descendió a 60,6%. El tenor en Al₂O₃ también es prácticamente constante en las muestras estudiadas, oscilando en cinco de ellas entre 12,38 y 12,97%. La excepción es la muestra tomada a 20-30 cm de profundidad en el tratamiento subsolado con yeso que presenta el máximo de 15,50% de Al₂O₃. La serie de Los Cardos presenta, por lo tanto tenores en SiO₂ superiores y tenores en Al₂O₃ inferiores a los de la serie Arroyo Dulce. Teniendo en cuenta estos resultados junto con los de la mineralogía de la arcilla, se pone de manifiesto diferencias de composición entre las series de suelos de Los Cardos y Arroyo Dulce.

Los tenores de Fe₂O₃ (3,88 a 5,29%), K₂O (2,54 a 2,77%), Na₂O (1,39 a 1,76%), CaO (1,64 a 1,73 %) y MgO (0,79 a 1,12%) no presentan oscilaciones importantes entre las diferentes profundidades y tratamientos estudiados y sus valores reflejan la composición del material parental de origen loessico. Los tenores de K₂O, Na₂O y MgO tienden a ser ligeramente superiores en la serie Los Cardos que en la serie Arroyo Dulce, mientras que los tenores en CaO tienden a ser inferiores en la serie Los Cardos.

La serie Los Cardos también presenta un tenor en fósforo total relativamente bajo, que oscila entre 148 y 226 mg/Kg. No obstante los tenores de fósforo en Los Cardos son más elevados que en Arroyo Dulce para todos los tratamientos y a todas las profundidades estudiadas. En los Cardos, se observa un gradiente de tenor de P en función de la profundidad, de modo que el mayor contenido de P₂O₅ de los horizontes superficiales pone de manifiesto el efecto de la fertilización fosfatada, al igual que en Arroyo Dulce.

Tabla 29. Elementos minoritarios de la serie Los Cardos en Bouquet a sucesivas profundidades.

	MnO	CuO	ZnO	SO₃	BaO	ZrO₂	Rb₂O	SrO
	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm
TESTIGO (0-10)	0.151	98	151	0.127	590	395	115	358
TESTIGO (10-20)	0.150	109	146	0.110	653	395	118	358
TESTIGO (20-30)	0.151	105	144	0.095	630	408	123	374
SUB+Y (0-10)	0.157	104	147	0.110	640	392	117	360
SUB+Y (10-20)	0.157	108	144	0.094	625	395	119	362
SUB+Y (20-30)	0.138	120	174	0.068	515	395	142	342

Test.: testigo, **Sub + y:** subsolado + yeso

Los tenores de TiO₂ (Tabla 28) oscilan entre 0,81 y 0,86 % y los tenores de ZrO₂ (Tabla 29) lo hacen entre 392 y 408 mg/Kg en la serie de Los Cardos, siendo ambos inferiores a los registrados en la serie Arroyo Dulce. Estos resultados sugieren que el suelo de la serie Arroyo Dulce ha sufrido una meteorización algo más intensa que el suelo de Los Cardos, lo que también está de acuerdo con la composición mineralógica de ambas series de suelos. Los tenores de RbO₂ y SrO también son inferiores en la serie Los Cardos cuando se comparan con los de la serie Arroyo Dulce.

Los tenores de MnO (138 a 157 mg/Kg), CuO (98 a 120 mg/Kg), ZnO (146 a 174 mg/Kg) y BaO (515 a 653 mg/Kg) presentan escasas oscilaciones en profundidad y no muestran diferencias entre los tratamientos testigo y

subsulado con enmienda a base de yeso. El tenor en MnO resultó ser ligeramente superior en Los Cardos que en Arroyo Dulce, el tenor de CuO y BaO fue inferior en Los Cardos y el tenor de ZnO fue sensiblemente igual en ambas series de suelos.

Los tenores en SO₃ detectado por FRX de la serie Los Cardos, que oscilan entre 0,068 y 0,127 % tienden a ser inferiores a los medidos en la serie Arroyo Dulce. Tanto en el tratamiento testigo como en el subsulado con yeso se observa una tendencia a la disminución del tenor en SO₃ con la profundidad, pero no se ponen de manifiesto el aumento del contenido en este compuesto con la enmienda a base de yeso.

Al igual que en la serie Arroyo Dulce, tampoco en Los Cardos se pudieron detectar diferencias en los contenidos en calcio y azufre totales entre el tratamiento testigo y el tratamiento de subsulado profundo con enmienda de yeso mediante la técnica de FRX.

4.3.4.- Propiedades físicas

Se presentan a continuación los resultados del estudio de las propiedades físicas en La Peti (Bouquet), tras los chequeos efectuados en junio de 2002 y en septiembre de 2003.

4.3.4.1.- Primer muestreo

En el primer muestreo, efectuado a los 9 meses de iniciado el ensayo se determinó densidad aparente entre 0 y 10 cm de profundidad y resistencia mecánica a penetración con cono 0 y 40 cm de profundidad, por niveles sucesivos de 5 cm.

Tabla 30. Resistencia a penetración (MPa) entre 0 y 40 cm de la serie Los Cardos en Bouquet a los 9 meses de iniciado el ensayo.

Profundidad	Subsolado+yeso	Subsolado	Testigo
Cm	MPa		
0-5	0,7	0,8	1,4
5-10	2,0	2,2	4,9
10-15	2,1	2,3	5,6
15-20	1,7	2,7	5,6
20-25	1,6	2,6	3,9
25-30	1,6	2,7	3,0
30-35	1,5	2,7	3,0
35-40	2,5	3,5	3,0

La densidad aparente media de las tres repeticiones entre 0 y 10 cm fue de 1,16, 1,16 y 1,29 g/cm³ en los tratamientos subsolado con enmienda de yeso, subsolado y testigo, respectivamente, poniendo de manifiesto el efecto de la descompactación.

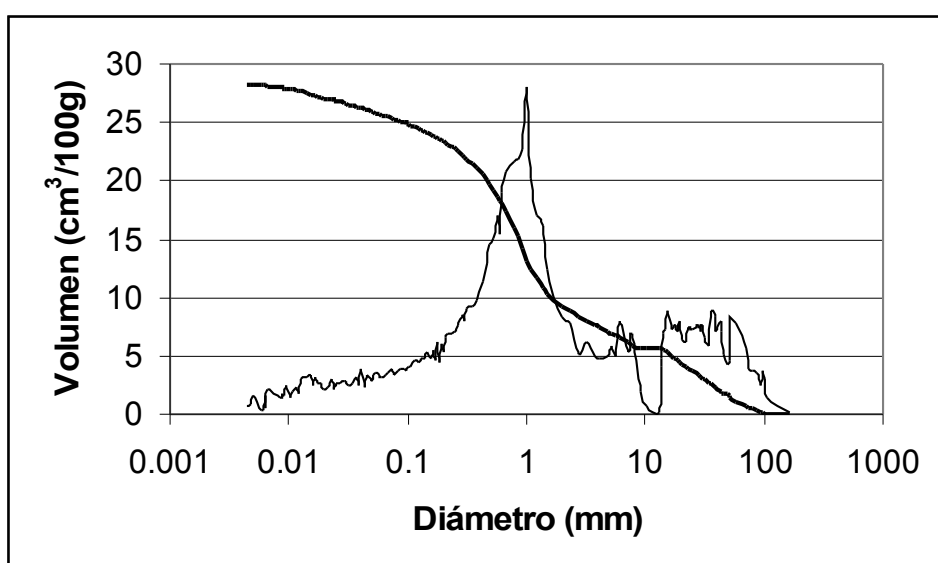
En la Tabla 30 se observa que hay menor resistencia a penetración hasta los 40 cm de profundidad en el suelo subsolado con yeso respecto del testigo y del suelo subsolado, solamente. Esto ocurrió un poco antes de que finalizase el primer año de realizado el tratamiento. Busscher et al., 2000, comprobaron que los efectos del subsolado son de corta duración, solo por una estación de cultivo. Los resultados de resistencia a la penetración ponen de manifiesto por lo tanto un efecto del subsolado que se refleja en todo el perfil, hasta 40 cm de profundidad y una acción adicional del yeso que se observa sobre todo entre 15 y 40 cm de profundidad.

4.3.4.2.- Segundo muestreo

El segundo chequeo se efectuó en septiembre de 2003, por lo tanto a los 24 meses de iniciado el ensayo. Las determinaciones efectuadas en campo fueron las siguientes: densidad aparente, resistencia a la penetración, contenido en humedad e infiltración. Además, se tomaron muestras para determinaciones de porosimetría por intrusión de Hg y superficie específica en laboratorio.

En la serie Los Cardos, la distribución del tamaño de poro medida por la técnica de intrusión de Hg, también se estudió en seis agregados tomados en los tratamientos testigo y subsolado más yeso a las tres profundidades habituales de muestreo. Una síntesis de los resultados se presenta en la Figura 27, así como en la Tabla 31.

Figura 27.- Ejemplo de curva acumulativa de intrusión de Hg y de la distribución de frecuencia resultante en función del tamaño de poro. Serie Los Cardos. (Testigo, 0-10 cm).



Al igual que en la serie Arroyo Dulce, en todas las curvas de intrusión de Hg de la serie Los Cardos, se pudo comprobar que la distribución de frecuencias de los poros comprendidos entre 100 y 0.005 μm era de tipo bimodal, con una fase mayor o principal y una fase secundaria de entrada de Hg. El límite entre ambas fases se sitúa aproximadamente en el entorno de tamaño de poro

próximo a 10 μm . El máximo de intrusión de Hg en la fase principal ocurre en el entorno próximo a 1 μm (Figura 27).

El volumen total de Hg inyectado entre 100 y 0.005 μm para los seis agregados estudiados osciló entre 16.01 y 21.09 $\text{cm}^3/100\text{g}$ en la serie Arroyo Dulce (Tabla 14), mientras que en la serie Los Cardos lo hizo entre 24,27 y 32,73 $\text{cm}^3/100\text{g}$ (Tabla 35). Los valores medios se cifran en 18,23 y 27,84 $\text{cm}^3/100\text{g}$ para Arroyo Dulce y Los Cardos, respectivamente. La porosidad de la serie Los Cardos en el entorno de tamaño de poro comprendido entre 100 y 0.005 μm , de acuerdo con los datos obtenidos con la técnica de intrusión de Hg, resultó ser significativamente superior a la correspondiente a la serie Arroyo Dulce ($P < 0.05$).

Tabla 31. Distribución de tamaño de poro en agregados individuales de los tratamientos testigo y subsolado con yeso ($\text{cm}^3/100\text{g}$).

Diámetro (μm)	Testigo			Descompactado con yeso		
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
100-50	15,07	21,64	10,86	30,06	9,27	11,33
50-30	15,15	18,81	9,60	31,91	13,31	7,99
30-10	25,84	22,91	19,60	33,38	18,34	13,43
10-2	34,84	34,88	25,23	35,25	33,91	27,89
2-.5	103,90	97,93	79,06	101,30	101,01	85,28
.5-.2	37,80	48,20	51,25	43,29	47,61	47,58
.2-.05	25,69	28,58	29,86	27,94	29,63	29,49
.05-.01	18,99	18,97	18,81	19,33	19,17	16,64
.01-.005	3,74	2,58	3,77	4,81	4,44	3,12
Total	281,02	294,50	248,04	327,27	276,69	242,75

En la profundidad de 20 a 30 cm se midió un volumen de poros en el entorno de diámetros equivalentes comprendidos entre 100 y 0.005 μm que en los niveles superiores, lo que pone de manifiesto una mayor compacidad de este nivel y está de acuerdo con los resultados de resistencia a penetración.

La porosidad de almacenamiento o mesoporosidad en los agregados de Los Cardos osciló entre 13,35 y 20,18 $\text{cm}^3/100\text{g}$, cifras que también son superiores

a las de Arroyo Dulce que variaron entre 9,98 y 13,68 cm³/100g. Los valores medios respectivos ascendieron a 11,70 y 16,51 cm³/100g en las series Arroyo Dulce y Los Cardos, significativamente diferentes (P<0.05). En la serie Los Cardos la porosidad de almacenamiento supuso entre un 53,8 y un 64,0 % de la porosidad total, mientras que en la serie Arroyo Dulce estas cifras oscilaron entre un 61,0 y 67,9 % del total de los poros determinados por intrusión de Hg. Dada la correlación entre volumen de mesoporos y agua útil, cabe esperar que en la serie Los Cardos el almacenamiento de agua útil, entre capacidad de campo y punto de marchitez sea más elevado que en la serie Arroyo Dulce.

En la tabla 32 se puede observar la superficie específica obtenida a través de los diagramas de adsorción de N₂ según el método BET. Los resultados para cada profundidad son la media de dos determinaciones.

Tabla 32. Superficie específica a sucesivas profundidades en las parcelas testigo y descompactadas con yeso (m²/g).

Testigo			Subsolado con yeso		
0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
20,7	23,5	28,5	20,1	24,2	23,6

Las muestras tomadas a la profundidad de 0-10 cm son las que presentan una menor superficie específica, tanto en el testigo como en el tratamiento subsolado con enmienda de yeso, con valores de 20,7 y 20,1 m²/g, respectivamente. Si se prescinde de la muestra con superficie específica elevada, el valor de este parámetro es mayor en la serie Arroyo Dulce que en la serie Los Cardos. En los niveles de 10 a 20 cm y de 20 a 30 cm la superficie específica oscila entre 23,5 y 28,5 m²/g, en testigo y entre 23,6 y 24,2 en el tratamiento subsolado con enmienda a base de yeso.

Los valores de superficie específica medidos en la serie Los Cardos son inferiores a los obtenidos en un Argiudol de Entre Ríos, de acuerdo con los datos recientemente presentados por Wilson (2007). Estos resultados se explican en buena parte por las diferencias de contenido en arcilla en función de la profundidad. Sin embargo, si se tienen en cuenta los datos de superficie específica de las series Arroyo Dulce y Los Cardos, no siempre se aprecia una proporcionalidad entre los mismos y el contenido en arcilla.

En la Tabla 33 se presenta un resumen de los datos obtenidos en campo, durante el chequeo efectuado en 2003, 24 meses tras el inicio del ensayo en La Peti. En primer lugar se presenta la síntesis de estos resultados y, a continuación, se estudian los efectos de los diferentes parámetros.

En las mediciones de resistencia a la penetración, se encontraron diferencias significativas a favor de los tratamientos descompactados respecto del testigo (Tabla 33) hasta 35cm de profundidad. Radcliffe et al, 1986, demostraron que la resistencia a penetración de cono era menor en suelos tratados con yeso, porque el yeso promueve la actividad de las raíces, que a su vez disminuyen la impedancia mecánica en esa zona.

El contenido de humedad acumulada hasta 30cm de profundidad, no muestra diferencias significativas entre tratamientos. De 30 a 50cm de profundidad sí hay diferencias significativas a favor de la descompactación (Tabla 33). Los datos de resistencia a penetración han de ser interpretados en función del tenor de humedad.

La infiltración media de lluvia simulada en una hora de ensayo, muestra diferencias significativas a favor de los tratamientos de descompactación (Tabla 33). En cuanto a la tasa final de infiltración también hay diferencias significativas de ambos tratamientos respecto del testigo, pero se observa una tendencia importante entre el subsolado+yeso con una tasa final 10 mm/hora mayor que el subsolado sin enmienda.

Tabla 33. Valores promedio de los diferentes parámetros físicos medidos en el segundo muestreo de la serie Los Cardos en Bouquet a los 24 meses de iniciado el ensayo.

Parámetro	Prof.	Subsolado+yeso	Subsolado	Testigo
Densidad aparente (g/cm³)	0-10	1,08	1,09	1,15
	10-20	1,27	1,31	1,26
Resistencia a Penetración (Mpa)	0-5	0,83 a	1,30 b	1,61 c
	5-10	2,53 a	2,87 a	4,10 b
	10-15	2,60 a	3,10 a	3,50 c
	15-20	2,07 a	2,57 b	3,53 b
	20-25	2,10 a	2,13 a	3,40 b
	25-30	2,00 a	2,00 a	2,90 b
	30-35	2,40 a	2,23 a	3,13 b
	media	2,07 a	2,31 a	3,17 b
Humedad Gravimétrica (%)	0-10	15,6 a	5,9 a	20,4 b
	10-20	21,7 a	21,8 a	22,9 a
	20-30	26,6 a	26,6 a	25,9 a
	30-40	27,5 ab	28,7 a	25,4 b
	40-50	29,3 a	28,7 a	26,9 b
Infiltración media (mm/h)		56,2 a	55,3 a	32,7 b
Infiltración final (mm/h)		54,0 a	44,0 a	14,0 b
Escurrimiento/Precipitación		0,06 a	0,10 a	0,45 b

Valores en cada fila seguidos por diferentes letras, son significativamente diferentes (P<0,05).

Por tanto, la tasa de infiltración en los dos tratamientos que incluyeron el subsolado fue superior a la del tratamiento testigo. Esto se reafirma cuando se toma en cuenta la tasa de infiltración final. Estos datos señalan que los tratamientos con labranza profunda captaron más eficientemente agua, contribuyendo a aumentar la sustentabilidad.

Por su parte, la relación escurrimiento/precipitación muestra una disminución muy importante y significativa entre el testigo y los tratamientos subsolados, de modo que desciende de 45% en el primero a 10 % y a 6 % en el subsolado y el subsolado con yeso, respectivamente. Por ello, la labranza profunda produjo un incremento considerable de la captación del agua de lluvia. La lluvia efectiva

en el tratamiento subsolado+yeso fue casi el doble de la registrada en el testigo.

El hecho de que el tenor de humedad no varíe entre tratamientos en algunas profundidades, como ocurre entre 10 y 30 cm hace que los valores de resistencia a penetración puedan ser comparados directamente en estos tratamientos. En estas profundidades se pone de manifiesto que para niveles de contenido hídrico similar se cumple la relación: testigo > subsolado > subsolado con yeso.

Analizando la resistencia a penetración por niveles se comprueba que en el testigo entre 5 y 25 cm los valores de este parámetro superan el umbral de 3,4 MPa, mientras que con subsolado el valor máximo ascendió a 3,10 MPa y se registró entre 10 y 15 cm y con subsolado más yeso a la misma profundidad se midió un máximo de 2,60 MPa.

A las profundidades comprendidas de 0 a 5 y de 15 a 20 cm los tres tratamientos presentaron diferencias significativas ($P < 0.05$). Sin embargo, en los niveles de 5 a 10, 10 a 15, 20 a 25, 25 a 30 y 30 a 35 cm las diferencias de resistencia a penetración fueron significativas ($P < 0.05$) al comparar el testigo frente a los tratamientos subsolados, pero no lo fueron al comparar el subsolado y el subsolado con yeso entre sí.

En las mediciones de los valores de Densidad Aparente (DA) de las parcelas las diferencias encontradas son estadísticamente significativas, con el menor valor en descompactado+yeso y el mayor valor el testigo. Es decir, la densidad aparente de descompactado con yeso es significativamente menor que la del testigo, considerando los valores medios (Tabla 34).

Tabla 34. Síntesis de los resultados de densidad aparente-porosidad total en el segundo muestreo del ensayo de La Peti, serie Los Cardos.

Tratamiento	Densidad aparente (gr/cm³)	Porosidad (%)
Subsolado.+yeso	1,116 a	56,2 a
Subsolado	1,180 ab	55,5 a
Testigo	1,258 bc	52,5 a

Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) por test de Duncan.

Respecto a la Porosidad total, si bien los resultados indican una tendencia similar, las diferencias no fueron significativas (Tabla 34).

Tabla 35. Síntesis de resistencia a penetración hasta 30 cm (Mpa) en el segundo muestreo del ensayo en La Peti, serie Los Cardos.

Tratamiento	Número de golpes	Resistencia a la penetración (Mpa) *
Subsolado.+yeso	32	1,45 a
Subsolado	79	3,36 ab
Testigo	106	4,83 b

Valores superiores a 2 Mpa afectan el normal desarrollo de las raíces de los cultivos.

Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) por test de Duncan.

En la Tabla 35 se presentan valores medios de resistencia a penetración con una humedad del suelo en el momento de la determinación entre 15 y 20 %. Además del dato de resistencia en MPa se indica el número de golpes usado a cada profundidad. Se comprueba que la resistencia a la penetración del descompactado con yeso es menor significativamente respecto del testigo.

La resistencia a la penetración que corresponde a un menor contenido hídrico por niveles sucesivos de 5 cm entre 0 y 5 cm de profundidad se presenta en la Tabla 36. En dicha Tabla se puede observar el nº de golpes que corresponde a cada profundidad, junto con el valor de la resistencia en MPa. Estos resultados también se presentan gráficamente en la Figura 28.

Tabla 36 . Resistencia a penetración hasta 50 cm.

Profundidad Cm	Subsolado + yeso		Subsolado		Testigo	
	nº golpes	MPa	nº golpes	MPa	nº golpes	MPa
0	0	0	0	0	0	0
5	1	0,27	1	0,27	1	0,27
10	5	1,37	5	1,37	8	2,19
15	9	2,46	9	2,46	33	9,03
20	10	2,74	15	4,11	31	8,48
25	8	2,19	14	2,85	23	6,29
30	9	2,46	13	3,56	19	5,2
35	9	2,46	14	2,85	15	4,11
40	12	3,29	12	3,29	17	4,65
45	16	4,38	12	3,29	18	4,93
50	16	4,38	14	2,85	18	4,93

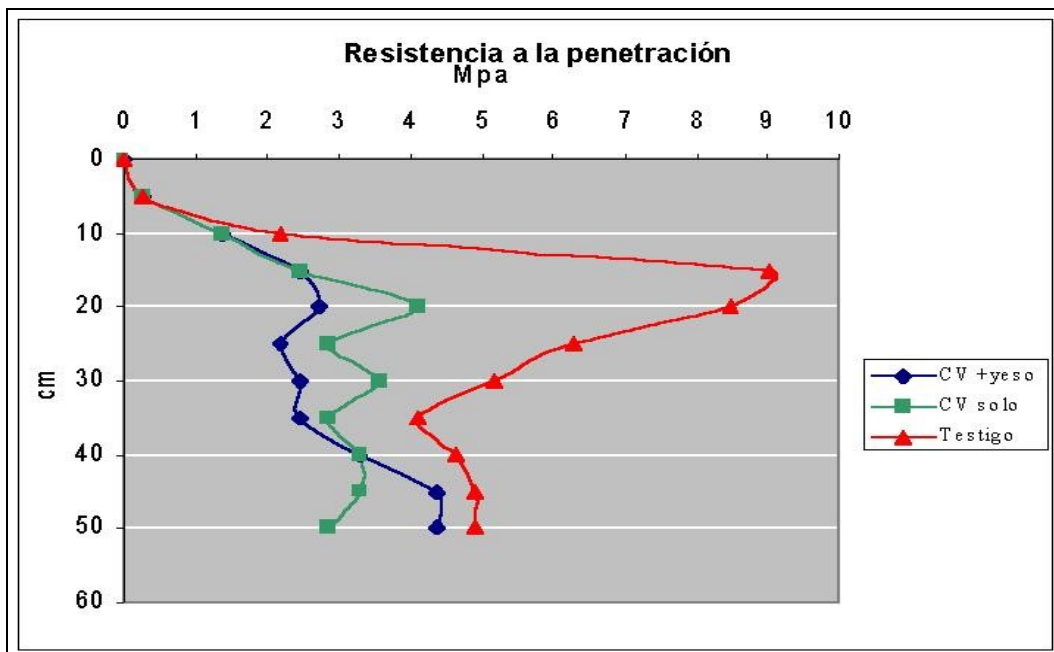
De los resultados de la Tabla 36 se puede inferir lo siguiente:

Que hasta los primeros 15cm no hay diferencias marcadas de los tratamientos subsolados con el testigo. De hecho, a 5 cm de profundidad la resistencia fue similar en los tres tratamientos y a 10 cm las diferencias fueron poco importantes.

Desde los 15 cm a los 40 cm, es evidente que hay una mayor resistencia a la penetración en el testigo respecto del descompactado + yeso. La resistencia a la penetración entre tratamientos resultó significativamente diferente, para dichas profundidades. La mayor diferencia entre estos tratamientos se aprecia a 15 cm y a 20 cm.

Las diferencias entre los tratamientos subsolado y subsolado con yeso entre 20 y 50 cm fueron menores. Entre 20 y 40 cm el descompactado presentó mayor resistencia a penetración y entre 40 y 50 cm se observó la tendencia inversa.

Figura 28. Resistencia a penetración hasta 50 cm de profundidad.



Es importante remarcar que al subsolar, la aplicación de yeso fue a una profundidad de 15 a 35 cm. Esto resulta coherente con los resultados de la penetrometría pues a partir de los 15 cm de profundidad, la diferencia de resistencia a la penetración es significativamente menor en descompactado + yeso que estaría indicando un efecto marcado del yeso como mejorador de la estructura, Busscher et al, 2000.

4.3.5- Perfil Cultural

Después de seis años de descompactado el suelo en este ensayo, se realizó un estudio de perfil cultural, considerando el tratamiento subsolado+yeso y el testigo. En la Figura 29 se puede apreciar una vista general de la trinchera de 2 m de largo por 0,5 m de profundidad, excavada para determinar el perfil cultural, así como un fragmento más detallado de la misma. En la segunda de estas fotografías se observa con nitidez la huella del subsolador en el tratamiento subsolado con yeso.

En el análisis del perfil cultural, que se presenta en la Figura 30, se pudo determinar que están marcadas las grietas abiertas por el descompactador con yeso, labradas seis años atrás. Esto pudo ser corroborado con el análisis con penetrómetro graficador, donde se puede observar en la misma Figura 30, la imagen del gráfico, con líneas de menor resistencia en coincidencia con lo determinado en el perfil cultural. Para interpretar dichas gráficas es necesario tener en cuenta que la escala horizontal de los datos leídos con penetrómetro oscila de 0 a 80 cm, mientras que la escala del croquis se extiende a lo largo de 190 cm aproximadamente.

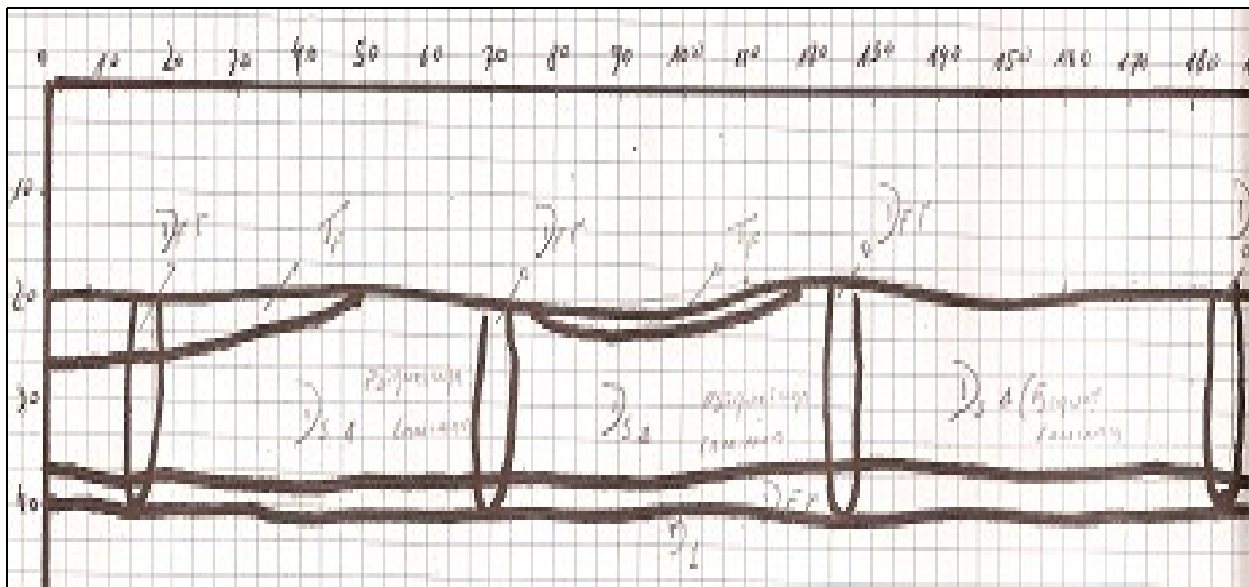
En comparación se observó en el perfil cultural del testigo, que no hay rastros de grietas como las encontradas en el anterior, como se puede comprobar en la Figura 31. En esta gráfica también se presenta la resistencia a penetración a lo largo de una extensión de 80 cm y un croquis a lo largo de un transecto de 190 cm de longitud. El perfil cultural pone de manifiesto la heterogeneidad de la estructura del suelo en los niveles comprendidos entre 15 y 40cm.

Figura 29. Trinchera de 0,50m por 2m con detalle del paso del subsolador + yeso (superior) y detalle de la misma en el que se aprecia la huella del subsolador (inferior).



Figura 30. Gráfico del penetrómetro y croquis del perfil cultural en el tratamiento subsolado con yeso.

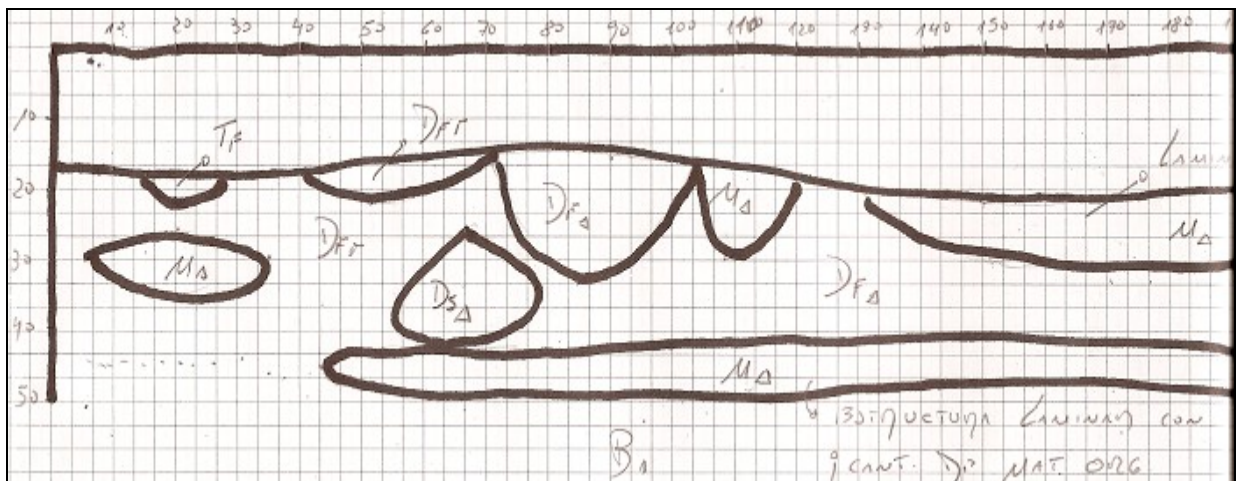
cm	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
0.0	632	0	526	421	526	35	0	667	0	0	175	0	0	175	421	140	0
2.5	1193	70	1474	526	1018	35	281	421	211	456	281	105	0	456	561	632	70
5.0	2246	1614	1965	1053	1614	842	1018	1018	175	702	526	912	667	1298	1018	1158	1544
7.5	3895	1474	2632	1404	2246	1860	1790	1404	1193	842	1298	1544	1123	2176	1439	1965	2491
10.0	2807	1825	3123	1614	2597	2316	2597	2702	2176	1018	1333	1825	1614	2070	1965	2070	2491
12.5	2597	1965	2948	1930	2562	2632	2667	2912	2877	1825	1404	1825	1719	2176	1684	2070	2456
15.0	2140	1825	2948	2176	2211	2421	2316	1684	2807	1614	1404	1614	2105	2491	1825	2456	2456
17.5	1895	2105	2667	1860	1825	2421	2456	1544	2702	1474	1544	1474	2421	2246	2246	2386	2491
20.0	1790	2070	1930	1404	1228	2070	2246	1895	2316	1369	1579	1579	2070	2246	2140	2176	2176
22.5	1860	1579	1649	1474	1193	1298	1965	1719	2351	1193	1333	1579	1930	1895	1895	2035	2070
25.0	1614	1193	1649	1930	1544	1228	2176	1649	2246	1228	1228	1684	2105	1965	2176	2035	2105
27.5	1333	1228	2035	2105	1369	1544	2070	1649	2035	1544	1684	1614	2105	1825	1930	1719	2105
30.	1649	1123	2035	2351	1298	1439	1193	1369	1860	1860	1684	1544	2491	1895	1790	1790	2421
32.5	0	1193	2386	2211	1579	1719	807	1158	1333	2105	1684	1579	2351	1965	1684	1825	2351
35.0	0	1369	2842	2456	1825	2211	1579	1684	1333	2211	1719	1474	2140	2070	1965	1790	2140
37.5	0	1649	2807	2562	1895	2176	1790	1790	2035	2316	1825	1579	2105	2105	1895	1825	2070
40.0	0	1790	2632	2562	2035	2070	1790	1825	1930	2070	1790	1439	2105	1930	1719	2211	1965
42.5	0	1930	2211	2702	1930	2176	1790	1684	1930	1930	1930	1579	2140	2140	2035	2140	1930
45.0	0	1790	2035	2632	1895	2035	1790	1649	1860	1579	2070	1930	2140	2246	2246	2211	2105



Nota: en los datos de resistencia a penetración se pueden observar tres intensidades de la escala de grises que corresponden a los rangos comprendidos entre 0 y 1000 KPa, 1000 y 2000 Kpa y > 2000 Kpa. La distancia entre sucesivas huellas de subsolador es de aproximadamente 50 a 60 cm.

Figura 31. Gráfico del penetrómetro y croquis del perfil cultural en el tratamiento testigo.

(cm)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
0.0	1298	70	597	632	561	281	105	386	316	351	632	772	351	912	105	211	35
2.5	1474	526	1333	702	1053	421	316	526	597	947	947	1333	526	947	211	456	35
5.0	2035	1158	1614	1298	1333	1193	807	456	1018	1474	1018	2105	877	1193	421	1193	667
7.5	1965	1719	2176	1649	1579	1474	1369	1298	1404	1579	947	2105	702	1369	807	1579	947
10.0	1649	1684	1825	2035	1895	1579	1895	1825	1579	1544	1018	1930	1123	1333	947	1930	1579
12.5	2316	1404	1719	1369	2070	1614	1684	1649	1930	1369	947	2070	1369	1790	1333	2105	1790
15.0	2140	1579	2246	1649	1404	1369	1053	1298	1404	1333	1684	2983	2105	2211	1965	2456	2948
17.5	1790	1860	2842	1684	1298	1088	1193	1228	1298	1298	1719	3053	1790	2105	1684	2632	2842
20.0	1860	1579	2070	1193	1228	1228	1088	1544	1228	912	1790	2667	1895	2035	1790	2386	2597
22.5	1614	1333	1333	1333	1018	842	842	1369	1228	772	1369	2105	1790	2070	1614	2351	2421
25.0	1053	1439	1298	1298	1088	807	1018	1298	1333	1053	1474	1965	1860	1930	1544	2351	2176
27.5	877	1369	1649	1123	877	702	842	912	1088	1369	1404	2035	1895	2035	1684	1965	2140
30.0	877	1684	1965	1649	1158	632	842	597	1158	1614	1439	2105	1825	2140	1649	2070	2351
32.5	912	2386	2105	2070	1860	1228	1649	456	1404	1404	1474	1860	1719	1895	1895	2140	2562
35.0	1930	2702	2140	1965	1684	1649	1895	877	1719	1579	1544	1965	1719	1719	1790	1965	2351
37.5	1930	2842	2211	1790	1649	1825	2035	1860	2562	1895	1579	2176	1790	1895	1614	1719	2176
40.0	1930	3088	2035	1684	1614	2105	1965	1825	2562	1825	1439	2176	1614	1930	1719	1825	1965
42.5	1825	2877	2035	1895	1544	2035	1930	1719	2246	1684	1369	2035	1684	1825	1790	2105	1930
45.0	1614	2246	1895	1965	1474	1895	1860	1684	1825	1684	1404	1895	1579	1930	1719	2211	1895



Nota: La resistencia a penetración también se representa mediante tres intensidades de la escala de grises que corresponden a los rangos comprendidos entre 0 y 1000 KPa, 1000 y 2000 Kpa y > 2000 Kpa. No se aprecian huellas de subsolador siguiendo la dirección vertical. Entre 15 y 50 cm se observa una notable heterogeneidad horizontal.

4.3.6.- Rendimiento

Para evaluar el rendimiento, antes de la cosecha se muestreó cada tratamiento, cortando al azar las plantas de dos submuestras de un metro de línea de cultivo y se determinó lo siguiente:

- Número de plantas
- Altura
- Número de nudos en cada rama
- Número de vainas en cada nudo
- Número de ramas en cada planta

La primera evaluación del rendimiento se efectuó en 2002. A fines del mes de Marzo el cultivo maduró y se cosechó en los primeros días de Abril. Los rendimientos de cada parcela y tratamiento se también muestran en la Tabla 37, en donde se consigna el rendimiento promedio de cada tratamiento en Kg/ha, así como los datos medios. Los resultados medios de rendimiento también pueden verse en la Figura 32.

Tabla 37. Rendimiento por tratamiento y repetición y diferencias entre tratamientos durante el año 2002, en La Peti, Bouquet.

	Producción, kg		
	Testigo	Subsolado	Subsolado+yeso
Repetición I	1.000	1.080	1.460
Repetición II	1.120	1.320	1.415
Repetición III	1.090	950	1.450
SUMA	3.210	3.350	4.325
Promedio	1.070	1.117	1.442
Promedio, kg/ha	3.088	3.223	4.161
	Sub+y vs. Testigo	Sub+y vs. Sub.	Sub. vs. Testigo
Diferencias (kg)	1.073	938	135
Diferencias (%)	35	29	4

Área de cada parcela: 3.465 m²

Los principales resultados de rendimiento del cultivo de soja se sintetizan a continuación:

1) El tratamiento con subsolado aumentó el número de plantas, su altura y el número de vainas, de modo que en general los parámetros medidos aumentaron.

2) Entre subsolado y testigo, hubo una diferencia de 4% con un nivel de variación importante como se observa en los resultados parciales. Las diferencias de rendimiento entre descompactado+yeso y descompactado fueron de 29% y con el testigo 35%, lo que marca una importante influencia del tratamiento descompactado con yeso.

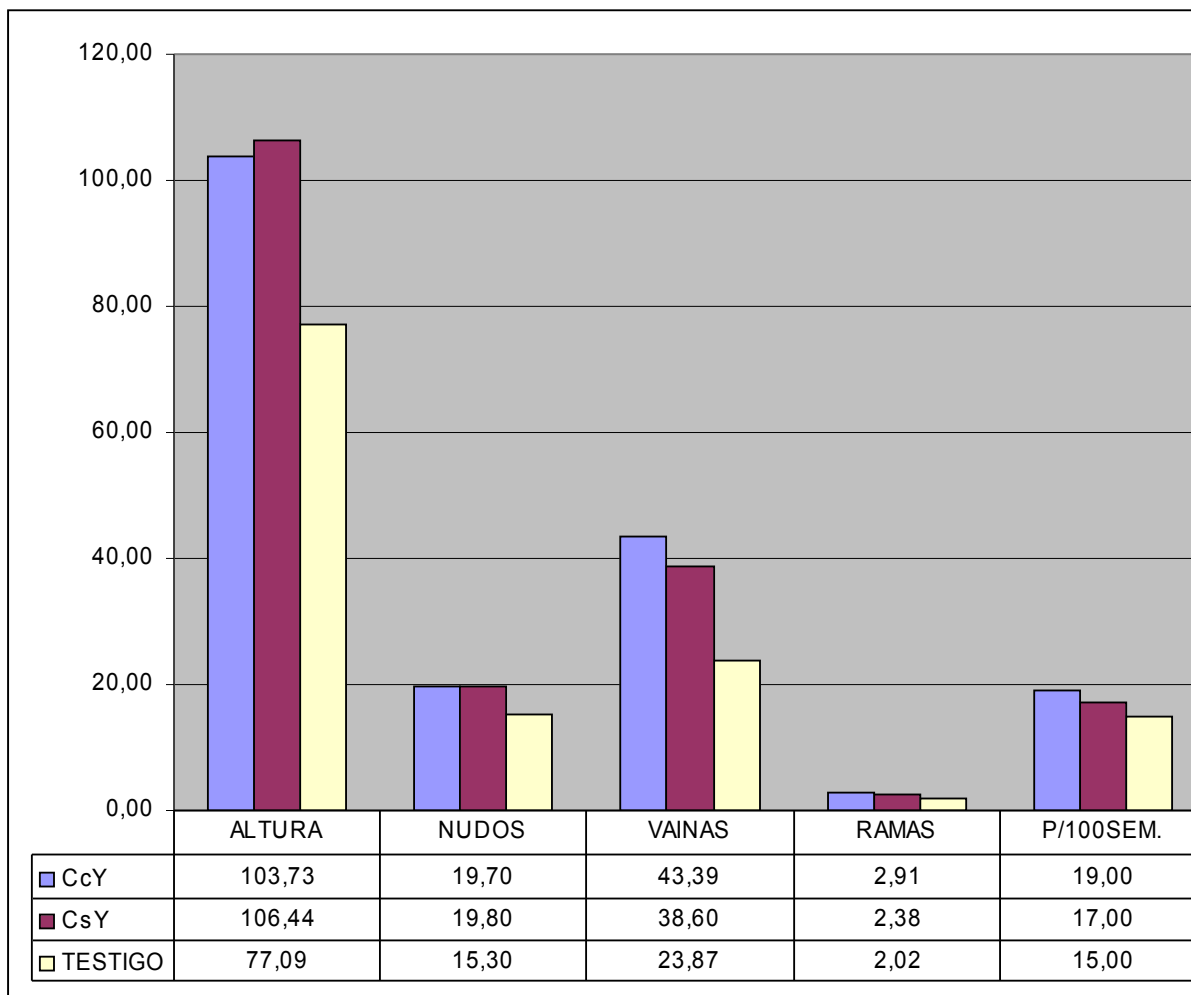
3) A igual densidad de siembra, nacieron y se desarrollaron mayor cantidad de plantas por metro lineal de surco en las parcelas con subsolado+yeso, que en las con subsolado solo y las testigo. Las plantas de las parcelas con subsolado+yeso, presentaron una mayor densidad de chauchas de desarrollo normal, que las de las parcelas de los otros tratamientos.

4) Las plantas de las parcelas subsoladas con adición de yeso presentaron una mayor densidad de chauchas de desarrollo normal que las de las parcelas de los otros tratamientos.

De acuerdo a Harrison et al, 1992, con el subsolado con yeso (5 ton/ha) los rendimientos aumentaron notablemente en algodón, con el efecto manteniéndose por dos años. Si bien el aporte del Azufre puede haber contribuido a incrementar los rendimientos, los resultados de la penetrometría y de densidad aparente (Tabla 31) estarían indicando la importancia de la estructura del suelo en el rendimiento del cultivo, determinando la mayor entrada de agua de lluvia al perfil, un mayor intercambio gaseoso con la atmósfera y un desarrollo radicular con menos limitaciones(Harrison et al, 1994).

También se observó que los tratamientos con yeso tenían un color verde más intenso, mayor desarrollo con subsolado+yeso y subsolado respecto del testigo, en todos los casos.

Figura 32. Resultados de rendimiento para altura, nudos, vainas, ramas y número de plantas. (CcY = subsolado con yeso; CsY= subsolado sin yeso).



De acuerdo con Radford et al., 2001, la reducción de los rendimientos de los cultivos por efecto del tránsito de maquinaria, se debe fundamentalmente a una reducción del almacenamiento de agua de lluvia y en consecuencia a una reducción de la eficiencia del uso del agua.

La segunda evaluación del rendimiento se efectuó a 30 meses de iniciado el ensayo. Los resultados de rendimiento por tratamiento y repetición se presentan en la Tabla 38. Se obtuvieron 4536 Kg/ha en el tratamiento de subsolado con enmienda de yeso, 2774 Kg/ha con subsolado, pero sin enmienda caliza y 2823 Kg/ha en el tratamiento testigo. El rendimiento tras

subsulado con enmienda de yeso, por tanto, fue significativamente más elevado ($P < 0.05$) que el de los dos tratamientos restantes.

Tabla 38. Rendimiento por tratamiento y repetición y diferencias entre tratamientos durante el año 2003, en La Peti, Bouquet.

Bloque	Subsolado+yeso	Subsolado	Testigo
I	1680	1006	940
II	1580	1080	1110
III	1610	1016	1106
Promedio	1623	1034	1052
Promedio (kg/ha)	4536 a	2774 b	2823 b

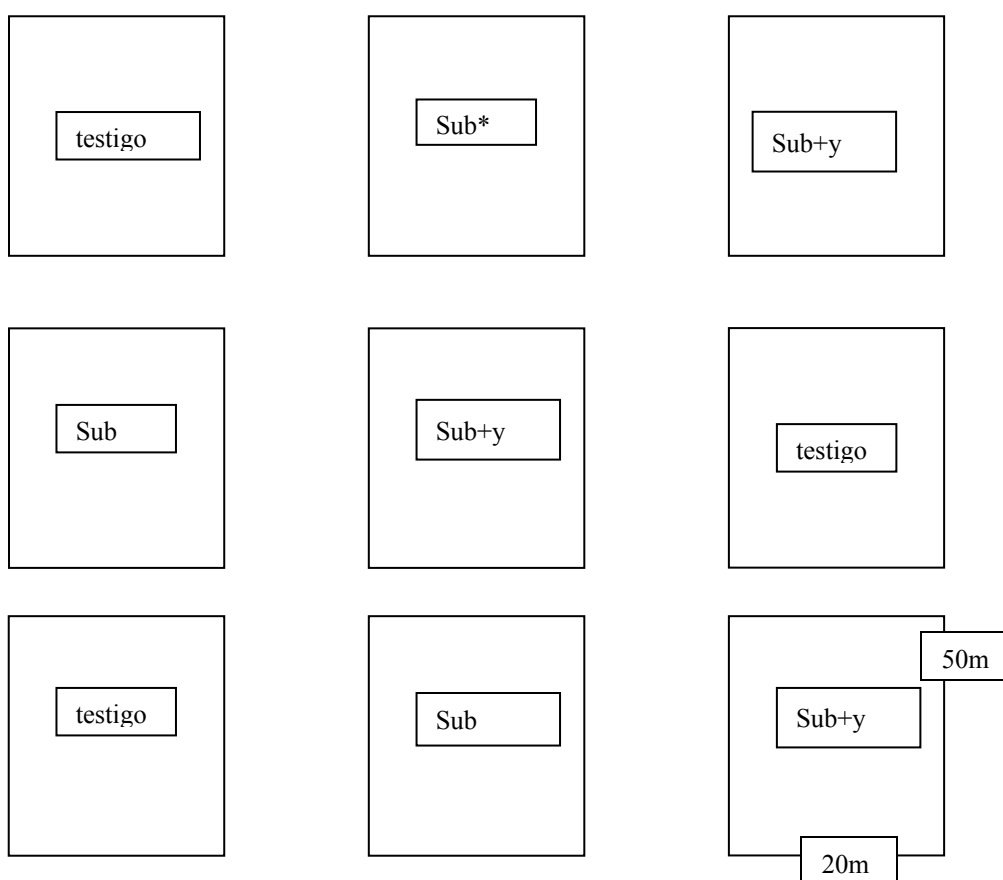
Área de cada parcela: 3.465 m²

En síntesis, se observó una producción de soja en subsulado + yeso, 60% mayor al testigo, corroborando con esto que la duración del subsulado + yeso se prolongó mas de 30 meses, mientras que el subsulado solamente ha retornado a la misma condición del testigo.

4.4.- Serie Los CARDOS: ensayo en campo Pavoni, Las Rosas

El ensayo se inició en septiembre de 2003. Se plantearon nueve parcelas de 20 m de ancho por 50 m de largo, en las que también se compararon tres tratamientos con tres repeticiones cada uno (Figura 33).

Figura 33. Diseño del segundo ensayo de campo de la serie Los Cardos en campo Pavoni (Las Rosas).



Sub+y=subsolado+yeso, Sub=subsolado.

En este campo se efectuaron chequeos en 2004 y 2006. En el año 2004 se pudo medir resistencia a penetración, humedad gravimétrica y densidad aparente. En 2006 se midió infiltración, además de los anteriores parámetros, es decir, resistencia a penetración, humedad gravimétrica y densidad aparente. Por otra parte, tras seis años de iniciada la experiencia se pudo efectuar una evaluación del perfil cultural.

4.4.1.- Primer muestreo

Se pudo comprobar que ambos tratamientos de subsolado muestran un mejoramiento de la estructura de este suelo, como el descenso de la densidad aparente y la resistencia a la penetración. Sin embargo, la adición de yeso al subsolado no mostró un efecto positivo en la estructura. Tan solo mostró un efecto significativo en la capacidad de infiltración del suelo (Tabla 39). Este efecto positivo se debe al efecto del yeso manteniendo la conductividad hidráulica del suelo y la disminución del encostramiento.

Tabla 39. Valores promedio de los diferentes parámetros físicos medidos en el primer muestreo de la serie Los Cardos en campo Pavóni, Las Rosas.

Parámetro	Prof.	Subsolado+yeso	Subsolado	Testigo
Densidad aparente (g/cm³)	0-10	1,08	1,09	1,28
	10-20	1,27	1,31	1,44
Resistencia a Penetración (Mpa)	0-5	0,55	0,40	1,25
	5-10	1,93	0,83	3,86
	10-15	1,66	1,75	3,70
	15-20	1,66	1,93	2,32
	20-25	1,66	1,66	1,75
	25-30	1,10	1,25	1,53
	media	1,43	1,30	1,53
Humedad Gravimétrica (%)	0-10	10,90	12,62	15,59
	10-20	17,25	19,50	17,57
Escurrecimiento/Precipitación		0,23	0,50	0,43

Valores en cada fila seguidos por diferentes letras, son significativamente diferentes (P<0,05).

Ambos tratamientos de subsolado muestran un mejoramiento de la estructura de este suelo, como el descenso de la densidad aparente y la resistencia a la penetración. Sin embargo, la adición de yeso al subsolado no mostró un efecto positivo en la estructura. Tan solo mostró un efecto significativo en la capacidad de infiltración del suelo (Tabla 39). Este efecto positivo se debe al efecto del

yeso manteniendo la conductividad hidráulica del suelo y la disminución del encostramiento.

4.4.1.- Segundo muestreo

El segundo muestreo se llevó a cabo en Junio de 2006, a los 33 meses de iniciado el ensayo. Los resultados se presentan en la Tabla 40 y en la Figura 34 para el tratamiento testigo y descompactado + yeso.

Tabla 40. Tasa de infiltración medida en el segundo muestreo de la serie Los Cardos en campo Pavoni, Las Rosas.

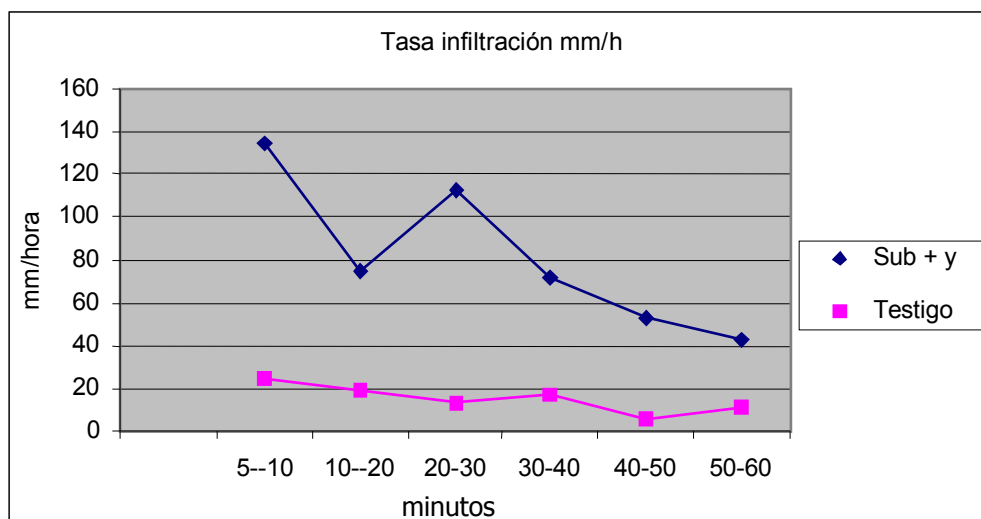
Tiempo minutos	Tasa de infiltración, mm/h	
	Subsolado + yeso	Testigo
0-5	323	215
5-10	134	25
10-20	75	19
20-30	113	13
30-40	72	17
40-50	53	6
50-60	43	11,5

El subsolado con aplicación de yeso, evidencia el efecto en una mayor infiltración. En los dos tratamientos la infiltración va disminuyendo en función del tiempo, pero las diferencias relativas del subsolado con yeso con respecto al testigo van aumentando. Ello evidencia que la infiltración en el testigo disminuye más rápidamente que en el tratamiento subsolado con yeso. Esta disminución de la infiltración, por otra parte, reduce el escurrimiento superficial del agua de lluvia, disminuyendo el riesgo de erosión hídrica en estos suelos en pendiente.

De acuerdo a Hall et al., 1994b, que el yeso incrementa la conductividad hidráulica saturada inmediatamente después de su aplicación. De acuerdo a Wallace et al., 1999, mejoró la tasa de infiltración del tratamiento con yeso y se mantuvo hasta ahora por 24 meses, ya que el yeso incrementa la concentración

de electrolitos del agua, lo que provoca la floculación de la arcilla, permitiendo una mayor infiltración del agua.

Figura 34. Comparación de la tasa de infiltración en los tratamientos testigo y subsolado con yeso.



Según Alcordo et al., 1993, la arcilla en presencia del yeso agregado, este se disuelve y con su fuerza iónica produce la floculación de la arcilla. El yeso granulado no disuelto mantiene la no plasticidad. Además, debido a la menor solubilidad de la aplicación granulada, su efecto es de mayor duración en el tiempo.

De acuerdo a Morrás et al., 2001, la ruptura de la capa compactada con labores de subsolado mejoró las condiciones físicas subsuperficiales del suelo, generando un incremento de la porosidad y una disminución de la resistencia a penetración. Los resultados obtenidos en este trabajo, por tanto, corroboran trabajos anteriores.

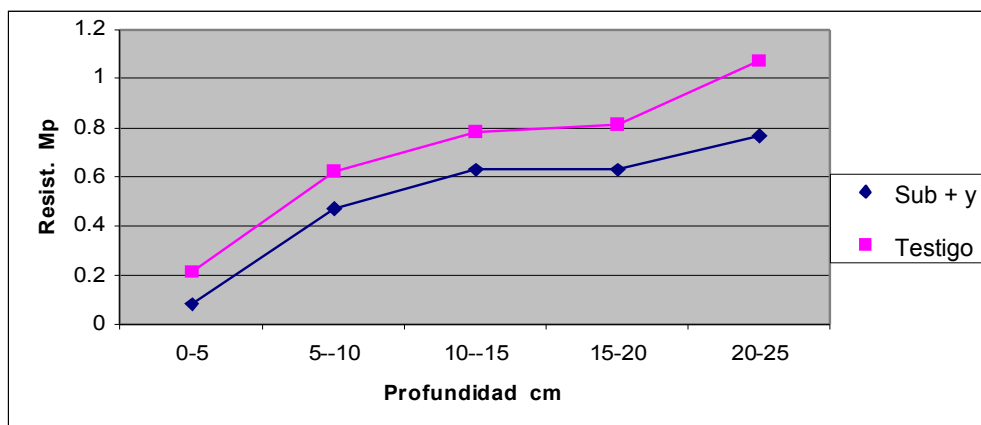
La resistencia a penetración medida en campo Pavoni durante el segundo muestreo se presenta en la Tabla 41, en donde se comparan los tratamientos testigo y subsolado con yeso. Estos resultados también se presentan en la Figura 35.

Tabla 41. Resistencia a penetración medida en el primer muestreo de la serie Los Cardos en campo Pavoni, Las Rosas.

Profundidad, cm	Subsolado+yeso	Testigo
	----- Mpa -----	
0-5	0,08	0,21
5-10	0,47	0,62
10-15	0,63	0,78
15-20	0,63	0,81
20-25	0,77	1,07

Tanto en la Tabla 41 como en la Figura 35 se observa que en descompactado con yeso, la resistencia a penetración es significativamente menor que en el suelo testigo.

Figura 35. Comparación de la resistencia a penetración en los tratamientos testigo y subsolado con yeso.



Por tanto, una vez más se comprueba que la labranza profunda disminuyó el grado de compactación del suelo, medido en términos de densidad aparente, en los primeros meses lo mismo que la porosidad total. Con el tiempo esto se fue igualando al suelo testigo.

También se comprueba de nuevo que en el tratamiento Subsolado+yeso, se produjo el mejoramiento de una combinación de propiedades físicas que incrementan la infiltración de la lluvia y la exploración de raíces.

En la Tabla 42 se presentan los valores de densidad aparente y humedad medidas en dos tratamientos, testigo y subsolado con yeso a la profundidades de 0 a 10 y de 10 a 20 cm

Tabla 42. Densidad aparente y humedad medidas en el segundo muestreo de la serie Los Cardos en campo Pavoni, Las Rosas.

	Profundidad, cm	Bloque I	Bloque II	Bloque III	Promedio
Densidad aparente					
Subsolado + yeso	0-10	1,07	1,10	1,15	1,11
	10-20	1,22	1,17	1,14	1,18
Testigo	0-10	1,07	1,03	1,15	1,08
	10-20	1,25	1,21	1,25	1,24
Humedad					
Subsolado + yeso	0-10	25,9	26,8	25,1	25,9
	10-20	24,3	25,1	24,2	24,5
Testigo	0-10	23,3	28,5	26,0	25,9
	10-20	21,3	26,0	25,3	24,2

Se comprueba que durante la determinación, la humedad gravimétrica disminuyó ligeramente en profundidad, tanto en lo que se refiere a los valores promedios como entre tratamientos sucesivos. Las diferencias de contenido hídrico entre tratamientos se reflejan en las diferencias en resistencia a penetración de los mismos.

La densidad promedio y en cada uno de los bloques aumentó regularmente en profundidad en los tratamientos testigo y subsolado con yeso, como, se puede observar en la tabla 42. Los valores de densidad aparente, sin embargo, no reflejan las diferencias encontradas en resistencia a penetración e infiltración. La resistencia a penetración se muestra como el parámetro que se ajusta más a la realidad de la estructura del suelo.

De acuerdo a Velykis, 2000, las propiedades físicas mejoradas por el subsolado, se mantendrán por mas tiempo si se utiliza el suelo con cultivos de raíces profundas y de largo período de crecimiento, para estimular la regeneración de

la estructura iniciada con el subsolado. Pero esto no ocurrirá mientras se cultive soja que es de corto periodo de crecimiento y raíces poco profundas.

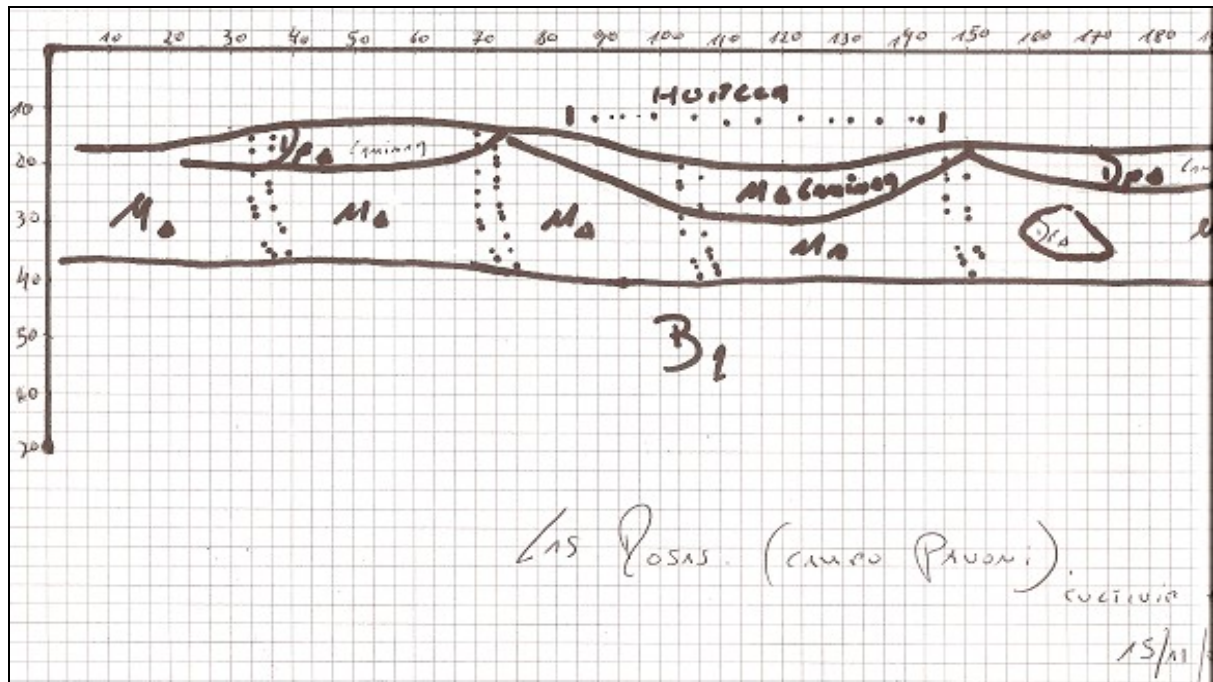
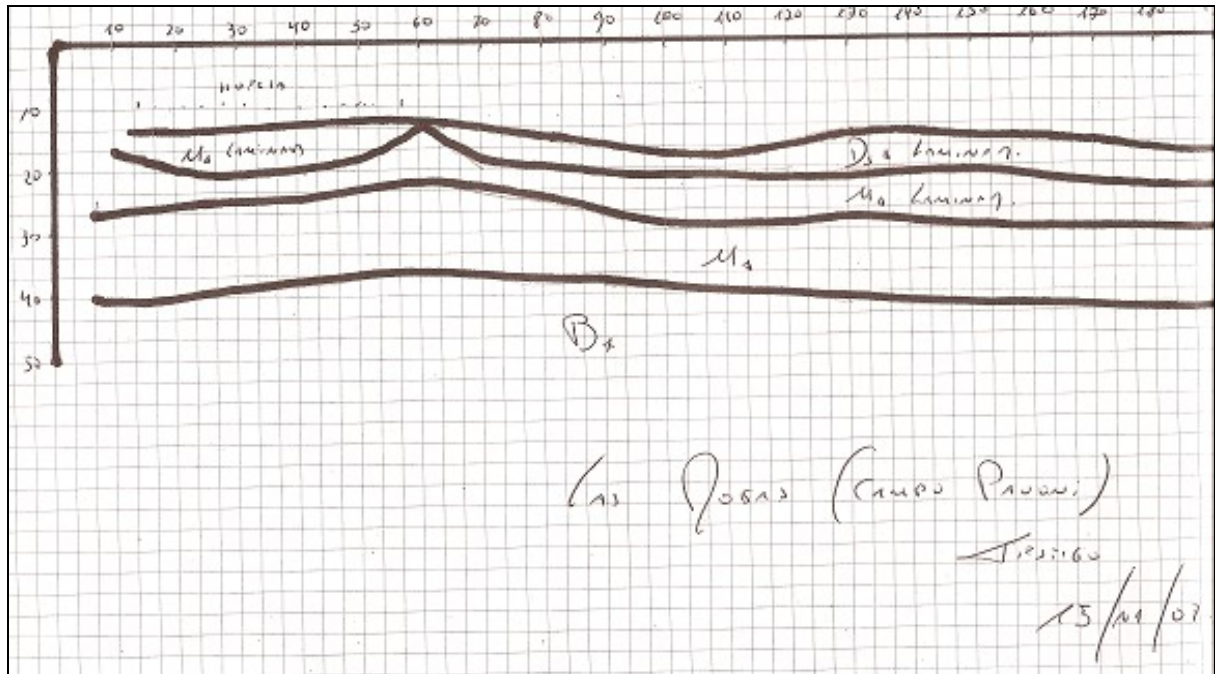
4.4.3 - Perfil Cultural

A tres años de realizada la descompactación se realizó la descripción del perfil cultural en el subsolado +yeso y en el testigo. La observación fue realizada el día 10 de noviembre de 2007.

En la Figura 36 está graficada la descripción del perfil cultural donde se observó bloques estructurales diferentes, entre el testigo donde se observa bloques continuos, mientras en el suelo descompactado con yeso, hay estructuras interrumpidas por el paso de las hojas descompactadoras, a la distancia correspondiente a la máquina utilizada. En este ensayo el testigo presentaba estructura laminar entre 10 y 40cm de profundidad. Por su parte las huellas de descompactación se situaban a espaciados del orden de 50 y 60cm y se pudieron observar desde la superficie hasta los 50cm de profundidad. En las áreas entre las huellas se mantenía la estructura laminar.

En el análisis del perfil cultural, se pudo determinar que están marcadas las grietas abiertas por el descompactador con yeso, labradas tres años atrás.

Figura 36. Croquis del perfil cultural en los tratamiento testigo (superior) y descompactado con yeso (inferior).



El paralelismo entre la morfología del perfil cultural y las medidas de resistencia a penetración en el ensayo efectuado en campo Pavoni, era manifiesto, como anteriormente se puso de manifiesto en los ensayos efectuados en La Peti, ambos en suelo de la serie Los Cardos.

En síntesis, el análisis del perfil cultural mostró su utilidad para determinar la topografía de las huellas marcadas por el descompactador con yeso. En una de las determinaciones se apreciaron diferencias morfológicas notables entre el testigo y el tratamiento subsolado con yeso, labradas tres años atrás y en otra los efectos se comprobaron tras seis años de labranza.

CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

1.- La illita es la arcilla predominante en los dos suelos; en la Serie Arroyo Dulce disminuye la proporción de illita y se observa una mayor cantidad de interestratificados irregulares illita-montmorillonita que en la serie Los Cardos, los que además se incrementan progresivamente con la profundidad. La caolinita se presenta en los dos suelos en pequeña proporción.

2.- Las dos series de suelos estudiadas se caracterizan por un tenor elevado en silicio, debido a la naturaleza loessica del material de partida. En la serie Los Cardos se observa un mayor tenor de silicio y menor tenor de aluminio que en la serie Arroyo Dulce. La técnica de Fluorescencia de Rayos X pone de manifiesto diferencias en el tenor de algunos microelementos entre las dos series de suelos.

3.- La porosidad medida por intrusión de mercurio es más elevada en el nivel superficial de 0-10 cm que a mayor profundidad. La porosidad de almacenamiento también disminuye con la profundidad en las dos series de suelos estudiados. La serie Los Cardos presenta mayor porosidad medida por intrusión de Hg que la serie Arroyo Dulce, tanto en el entorno de tamaño de poro de 100 a 0.005 mm como en lo referente a la mesoporosidad.

4.- La práctica del subsolado aplicada al cultivo de soja determina un impacto productivo de magnitud, en suelos muy degradados y erosionados, permitiendo obtener una rápida puesta en la producción de granos. Por otra parte, al producirse una mayor cantidad de rastros y mejorar la tasa de infiltración, se disminuyen los riesgos de erosión aumentando la sostenibilidad del sistema.

5.- En el tratamiento subsolado+yeso, se produjo el mejoramiento de una combinación de propiedades físicas que incrementan la infiltración de la lluvia y la exploración de raíces y por otra parte el mejoramiento de la fertilidad del suelo, por el aumento de azufre y calcio disponibles.

6.- Hay que considerar que el yeso aparte de ser un mejorador de la estructura es una fuente importante de azufre, elemento que empieza a ser deficitario en los suelos agrícolas de la región. El agregado de yeso soluble al suelo, en franjas separadas 70 cm, proporciona una cantidad importante de azufre y calcio a una profundidad muy apropiada para la captación de esos nutrientes por las raíces. El yeso así agregado al suelo, constituye una gran reserva de esos nutrientes, que puede ser utilizada en las cosechas futuras.

7.- La dosis de yeso ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de 600 kg/ha representa una aplicación de 85 Kg/ha de azufre y 115 Kg/ha de calcio, fácilmente asimilable por las plantas. La enmienda de yeso supone una dosis de azufre y calcio solubles importante a la profundidad justa de las raíces de los cultivos, y tuvo una buena respuesta en el crecimiento, desarrollo y en los parámetros morfológicos del cultivo. Luego de 40 meses se miden efectos físicos y químicos positivos de la enmienda a base de yeso.

8.- La labranza profunda produjo un incremento considerable de la captación del agua de lluvia. La lluvia efectiva en el tratamiento subsolado+yeso fue casi el doble de la registrada en el testigo.

9.- La tasa de infiltración en los dos tratamientos que incluyeron el subsolado fue superior a la del tratamiento testigo. Esto se reafirma cuando se toma en cuenta la tasa de infiltración final. Estos datos señalan que los tratamientos con labranza profunda captaron más eficientemente agua, contribuyendo a aumentar la sustentabilidad.

10.- La labranza profunda disminuyó el grado de compactación del suelo, en los diversos ensayos. La resistencia a penetración se muestra como el parámetro que se ajusta más a la realidad de la estructura del suelo. Por ejemplo en un ensayo en la serie Los Cardos, la resistencia fue significativamente diferente entre testigo y subsolado con yeso, términos de densidad aparente, a los 7

meses, igualándose a los 40. La porosidad total se comportó en la misma forma.

11.- El análisis del perfil cultural mostró su utilidad para determinar la topografía de las huellas marcadas por el descompactador con yeso. En una de las determinaciones se apreciaron diferencias morfológicas notables entre el testigo y el tratamiento subsolado con yeso, labradas seis años atrás. Se observa un buen paralelismo entre la topografía de las huellas estudiadas con el perfil cultural y las determinaciones de resistencia con penetrómetro

12.- Si bien el tratamiento del suelo con subsolado produce un mejoramiento de las propiedades físicas cuando se combina con yeso presenta los mejores resultados productivos. De acuerdo a estos resultados se detectan dos efectos, sobre el rendimiento del cultivo, por un lado el efecto subsolado y por el otro el efecto yeso. Los tratamientos con subsolado, aún después de 3 años de aplicados presentan incrementos productivos importantes.

13.- Las modificaciones físicas producidas por el subsolador al suelo, tienen también una residualidad importante después de 40 meses de su aplicación, lo que hace suponer que sus efectos se prolongarán en el tiempo por un lapso mayor, aún no determinado.

14.- En la infiltración se observó una tendencia positiva relacionada al subsolado con yeso, en el segundo año de tratado. Esto se asocia con la menor resistencia del suelo, con diferencia significativa al 5% respecto del testigo. Ambos cambios positivos se expresan en un aumento del rendimiento de soja de 14.65 % en el suelo tratado.

BIBLIOGRAFÍA

6-BIBLIOGRAFÍA

Alcordo, I.S.; J.E. Rechcigl. 1993. Phosphogypsum in agriculture: a review. *Advances in Agronomy*, 49: 55-118.

Alloway, B.J. 1995. Heavy metals in soils. 2nd Edition. Blackie Academia & Professional. London. 368 pp.

Andriulo, A.; F. Abrego; C. Ferreyra; M. Galetto; J. Galina; C. Irurtia; R. Mon; F. Rimatori; C. Sasal. 1998. Efecto de 11 años de riego complementario sobre algunas propiedades físicas del suelo. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Carlos Paz, Córdoba.pp:249-250.

Arens, P. L. 1969. Algunos efectos del riego suplementario sobre los suelos de la Pampa Ondulada. V Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Santa Fe. Argentina.

Arvidsson, J. 1998. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments.*Soil & Till.Res.* 49: 159-170.

Arzeno, J.; Corvalán, E. 2000. Experiencia de largo plazo (1990-2000) con cuatro sistemas de labranza en Salta, Argentina. XI Conferencia de la Organización Internacional para la Conservación del Suelo (XI ISCO). Buenos Aires, Argentina.

Baker, C.J.; K.E. Saxton; W.R. Ritchie. 1996. No-tillage seeding: science and practice. CAB International, Wallingford, U.K.

Barret, E.P.; L.G. Joynerand ; L.G. Halenda. 1951. The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from Nitrogen Isotherms. *J. Am. Chem. Soc.*, 73 (1): 373-380.

Baver, L.; W.H. Gardner; W.R. Gardner. 1991. Física de Suelos. Centro Regional de Ayuda Técnica. México. pp: 529.

Benito, E.; A. Paz; R. Pini. 1991. Aplicación de la técnica de porosimetría por intrusión de mercurio en el estudio de la porosidad de un conjunto de suelos del NW de España. Suelo y Planta, 1: 27-42.

Blackwell, P.S.; N.S. Jayawardane; J. Blackwell; R. White; R. Horn. 1989. Evaluation of soil recompaction by transverse wheeling of tillage slots. S.S.S.A.J. 53: 11-15.

Blackwell, P.S; A.J. Ringrose-Voase; N.S. Jayawardane; K.A. Olsson; D.C. Mackenzie; W.K. Mason. 1990. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. Journal of Soil Science 41: 215-228.

Blackwell,P.S.; N.S.Jayawardane; T.W.Green; J.T.Wood; J.Blackwell; H.J.Beatty. 1991. Subsoil macropore space of a transitional red-brown earth after either deep tillage, gypsum or both.I - Physical effects and short-term changes. Aust.J.Soil Res., 29:123-140.

Botta, G., D. Jorajuria, R. Balbuena, M. Ressia, C. Ferrero, H. Rosatto; M. Tourn. 2006. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annus L.*) yields. Soil Till. Res. 91: 164 - 172.

Braunack, M.V.; A.R. Dexter. 1989. Soil aggregation in the seedbed: a revision II. Effect of aggregate size in plant. Soil and Tillage Research 14: 281-298.

Bray, R.H.; G.W. Kurtz. 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci. (EE.UU.)* 59:3945.

Brown, G. ; G. W. Brindley. 1980. Cristal structures of clay minerals and their X-ray identification. *Mineral Soc. Monograph. 5.* Mineralogical Society. London

Brunauer, S.; P.H. Emmett; E. Teller. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society,* 60: 309–319.

Burgos J.J. 1969. Clima de la provincia de Buenos Aires en relación con la vegetación natural y el suelo. pp: 33 - 99.

Burns, R.G.; J.A. Davies. 1986. The microbiology of soil structure. *Biol. Agric.Hortic.* 3: 95-113.

Busscher, W.J.; J.R. Frederick; P.J. Bauer. 2000. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. *Soil Sci.Soc.Am.J.* 64:999-1003.

Carter, D.L.; M.M. Mortland; W.D. Kemper. 1986. Specific surface. p. 413–423. *In* A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

Carter M.R.; D.A. Holmstrom; L.M. Cochrane; P.C. Brenton; J.A. van Roestel; D.R. Langille; W.G. Thomas. 1996. Persistence of deep loosening of naturally compacted subsoils in Nova Scotia. *Can. J. Soil Sci.* 76, pp. 541–547.

Cerana, J.A. 1977. Suelos halomórficos. Curso de post grado de la Universidad Católica de Santa Fe Argentina.

Cerana, J.A. 1980. Deterioro de los suelos a consecuencia de riegos con aguas poco salinas que contienen bicarbonatos. IX Reunión argentina de la Ciencia del Suelo Paraná, Argentina.

Cohron, G.T. 1971. Gypsum and acid soils: The world scene. Adv. In Agronomy 5: 1-32.

Chen , Y.; A. Banin. 1975. Scanning electron microscope (SEM) observations of soil structure changes induced by sodium-calcium exchange in relation to hydraulic conductivity. Soil Sci. 120:428-436.

Cosentino D.J.; C. Pecorari. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana, Ciencia del Suelo 20 , pp. 9–16

De Battista,J.J.; A. Andriulo; M. Ferrari; C. Pecorari. 1994. Evaluation of the soils structural condition under various tillage systems in the Pampa Humeda (Argentina), Proceedings of the 13th ISTRO Conference Alborg, Denmark (1994), pp. 99–103.

De Boodt, M.; L. De Leenheer. 1967. West european methods for soil structure determinations. The St. Faculty Agronomic. Sci. 7 Ghent: 60-62. Bélgica.

Dexter, A.R. 1988. Strength of soil aggregates and of aggregate beds. CATENA Supplement 11:35-52.

Ellington, A. 1986. Effects of deep-ripping, direct drilling, gypsum and lime on soils, wheat growth and yield. Soil and Tillage Res. 8: 29-49.

European Environmental Agency. 2004. Soil Compaction Reports of the Technical Working Groups- Soil Protection. European Comission.

FAO. 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. Colección Montes N° 11, Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO Roma . 723 pp.

Farina, M.P.W.; P. Channon. 1988. Acid-subsoil amelioration: I. Comparison of several mechanical procedures. SSSAJ, 52: 169-175.

Fiés, J.C. 1984. Analyse de la repartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelette: comparaison entre un modèle d'espace poral et les dones fournies par la porosimétrie au mercure. Agronomie, 4: 891-899.

Fiès, J. C. ; A. Bruand. 1990. Textural porosity análisis of a silty clay soil using pore balance estimation, mercury porosimetry and backscattered electrom image análisis (BESI). Geoderma, 47: 209-219.

Franzluebbers, A.; H. Schomberg; D. Endale; R. Sharpe; M. Jenkins. 2002. Impact of Deep Ripping of Previous No-Tillage Cropland on Surface Soil Properties. Annual Southern Conservation Tillage Conference For Sustainable Agriculture

Fukunaka, H. 1980. Studies on the method of working execution and the effect of subsoil breaking. Res. Bull. Hokkaido National Agric. Exp. Station 128 , pp. 141–150.

Gambaudo, S. 2003. La acidez del suelo en la Región Pampeana Argentina. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pp:193-213.

Gaultney, L.; G.W. Krutz; G.C. Steinhardt; J.B. Liljedahl. 1982. Effects of subsoil compaction on corn yields. Trans of ASAE : 563-569.

Génova, L.J. 1993. Estudio de la degradación de suelos bajo riego complementario de cultivos extensivos con aguas subterráneas del acuífero pampeano en el norte de Buenos Aires. XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mendoza.

Gerard, C.J.; P. Sexton; G. Shaw. 1982. Physical factors influencing soil strength and root growth. *Agronomy Journal* 74: 875-879.

Goss M.J. 1991. Consequences of the activity of roots on soil. Plant root growth. Published by Blackwell Scf. British Ecological Soc. Special Publ.- 10, Ed. Atkinson D.- pp.171-186.

Greene, R.S.B.; I.B. Wilson. 1984. Some physical-chemical properties of an exposed B horizon of a red-brown earth treated with gypsum. *Aust.J.Soil Res*, 22: 357-63.

Greenwood, P.B.; K.C. Cameron. 1990. Subsoiling research in north Otago and Canterbury: an overview. In: Horne, D.J., Furkert, I.F.H. (Eds.), *Proceedings of the Fifth National Land Drainage Seminar*, Massey University, New Zealand, pp. 38–59.

Greweling, T.; M. Peech. 1965. Chemical Bulletin 960. Cornell University Agr. Exp. St. New York State College of Agriculture, Ithaca, New York.

Guerif, J. 1990. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength parameters. *Soil Till.Res.*, 16:167-178.

Guerif, J. 1994 . Effects of compaction on soil strength parameters. In: Soane, B.D.; C. van Ouwerkerk, *Soil Compaction in Crop Production*, pp.191-213. Elsevier.

Gutián F.; T. Carballas. 1976. Técnicas de análisis de suelo. Ed. Pico Sacro. Santiago de Compostela. 288pp.

Hakanson, I. ; R.C. Reeder. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load- extent, persistence and crop response. Soil and Tillage Res., 29: 277-304.

Hall, D.J.M.; D.C. McKenzie; D.A. MacLeod; A. Barrett. 1994a. Amelioration of a hardsetting Alfisol through deep mouldboard ploughing, gypsum application and double cropping. I. Soil physical and chemical properties. Soil and Tillage Res., 28: 253-270.

Hall, D.J.M.; D.C. McKenzie; D.A. McLeod; A. Barrett. 1994b. Amelioration of a hardsetting Alfisol through deep mouldboard ploughing, gypsum application and double cropping. II. Soil-water relationships. Soil and Tillage Res., 28: 271-285.

Hall A. J.; C.M. Rebella; C.M. Ghersa; J.Ph. Culot. 1992. Field-crop system of the Pampas. Chapter 19. In Ecosystems of the world. Field crop ecosystem. Ed C.J. Pearson.

Haneklaus, S.; W. Vogeland; E. Schnugg. 1994. Determination of environmental elements in contaminated soils by aqua regia extraction and X-ray fluorescent spectroscopy (XRF). En: 15th World Congreso of Soil Science. Acapulco. México. 509-516 pp.

Hamilton-Manns, M.; C.W. Rossb; D.J. Hornec ;C.J. Bakerd. 2002. Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on a structurally degraded soil. Soil and Tillage Research Vol. 68-2:109-119

Harrison, D.F.; K.C. Cameron; R.G. McLaren. 1994. Effects of subsoil loosening on soil physical properties, plant root growth and pasture yield. NZ J. Agric. Res. 37, pp. 559–567.

Harrison, W.J.; D.A. McLeod; D.C. McKenzie. 1992. The effect of clay addition and gypsum application on the physical properties of a hardsetting red-brown earth, and the response of irrigated cotton. Soil and Tillage Res. 25: 231-244.

Hénin, S. ; G. Monnier; A. Combeau. 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. Annales Agronomiques, 9: 73-92.

Hénin, S.; R. Grasy ; G. Monnier. 1972. El perfil cultural, el estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. Ed. Mundi Prensa. Madrid. 340 pp.

Horn, R.; J. Rostek. 2000. Subsoil compaction processes. Adv.in GeoEcology 32, 44-54.

Imeson, A.; C. Ritsema; R. Hessel. 2004. Research of erosion, compaction, floods and landslides.REPORTS OF THE WORKING THECNICAL GROUPS-EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY- EUROPEAN COMISSION – JOINT RESEARCH CENTER -VOL VI p.721-740.

Ingaramo, O. 2003. Indicadores físicos de la degradación del suelo. Tesis de Doctorado. Universidade da Coruña. Facultad de Ciencias. Área de Edafología.

I.N.T.A. 1974. Carta de suelos de la República Argentina. Buenos Aires, Salto. Hoja nº 3360, 3. 80 pp.

I.N.T.A. 1980. Carta de suelos de la República Argentina. Santa Fe, Las Rosas. Hoja nº 3363-12. 96 pp.

Irurtia, C.B. 1997. Influencia de los procesos de erosión y degradación de suelos en los rendimientos de los cultivos en el norte de la región pampeana. Informe Final Plan nro.31: 0031. Inst.de Suelos-INTA-Castelar.

Irurtia, C.; R. Mon. 1994. Microsimulador de lluvias para determinar infiltración a campo. INTA – CIRN – Instituto de Suelos. Public. Nº 176.

Irurtia, C.B.; R. Mon. 1998. Cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos de la Región Pampeana después de cinco años de riego suplementario. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Pp: 241-242

Irurtia, C.B.; R. Mon. 2000. Impacto de la erosión hídrica en la producción de granos en suelos Argiudoles de la pampa ondulada. 11º International Soil Conservation Organization Conference-ISCO , 22 al 27 Octubre 2000.BsAs.

Irurtia, C.B.; R. Mon. 2002. La aplicación profunda de yeso permite recuperar los suelos..Tranquera: Mayo 2002.La Plata.

Jackson, M. L. 1976. Análisis químico de suelos- Tercera Edición. Ed. Omega. S. A. Barcelona. 662 pp.

Jayawardane, N.S.; J. Blackwell. 1986. Effects of gypsum on infiltration rates and moisture movement in a swelling clay soil. Soil Use Management, 3: 114-118.

Jayawardane, N.S.; H.D. Barrs; W.A. Muirhead; J. Blackwell; E. Murray; G. Kirchhof. 1995. Lime slotting technique to ameliorate subsoil acidity in a clay soil.II. Effects on a medic root growth, water extraction and yield. Aust.J.Soil Res. 33: 425-441.

Jones, A.A. 1982. X-ray Fluorescent Spectrometry. In: Methods of Soil Analysis, part 2. Page, A. L., Millar, R. H. and Keeney, D. R., ed. ASA-SSSA. pp 85-121.

Jones, A.A. 1991. X-ray Fluorescent Análisis. In: Soil Análisis. Modern Instrumentation Techniques. Smith, K. A. 2nd Ed. M. Dekker.

Kamphorst, A.; G.H. Bolt. 1976. Soil Chemistry. A basic elements. Chapter 9. Saline and sodic soils. Elsevier Scientific Publishing Company, 281pp.

Kilmer, V.J.; L.T. Alexander. 1949. Methods of making mechanical analysis of soils. Soil Sci. 68:15-24.(16). Original: Robinson; G. W. J. Agr. Sci. 12:306-321.

Lagen van B. 1996. Soil analysis. In: Manual for Soil and Water Análisis. P. Buurman, B. van Lagen and E.J. Velthorst, eds. pp.45-57. Backhuys Publishers.

Lattanzi, A. R. 1997. La siembra directa y la agricultura sustentable. Seminario de Siembra Directa. INTA. Octubre 1997 pp:13-18.

Low, P.F. 1980. The swelling of clay. II-Montmorillonites. SSSAJ 44: 667-676.

Martínez, F.; G. Cordone. 1998. Fertilización azufrada en soja. Jornada de azufre UEEA INTA Casilda, Septiembre, Santa Fe, Argentina.

Martínez, F.; G. Cordone. 2000. Avances en el manejo de azufre: novedades en respuesta y diagnóstico en trigo soja y maíz. Jornada de actualización técnica para profesionales "Fertilidad 2000" IMPOFOS Cono Sur, Accasuso Buenos Aires, Argentina

Michelena, R; C. Irurtia; F. Vavruska; R. Mon; A. Pittaluga. 1989. Degradación de suelos en el norte de la Región Pampeana. Publicación Técnica Nº 6. INTA. Centros Regionales Buenos Aires Norte, Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe. Proyecto de Agricultura Conservacionista.

Miller, W.P. 1987. Infiltration and soil loss of three gypsum-amended Ultisols under simulated rainfall. S.S.S.A.J. 51: 1314-1320.

Mon, R. 1996. Estudio de la compactación del suelo producida por el uso de los equipos agrícolas como limitante productiva. Informe Final Plan 31:0024. Inst. de Suelos INTA Castelar.

Mon, R; C.B. Irurtia. 1998. Cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos de la región pampeana de cinco años de riego suplementario XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Córdoba.

Mon, R.; C.B. Irurtia. 2002. Qué pasa con el riego complementario en los suelos de la pampa ondulada. Tranquera: Julio 2002. La Plata.

Mon, R.; C.B. Irurtia. 2002. Recuperación con enmiendas de yeso. Super CAMPO: noviembre 2002, p.40-42.

Mon, R.; C.B. Irurtia. 2002. Tratamiento para la degradación. Super CAMPO: diciembre 2002, pp. 86-87.

Mon, R.; C. Irurtia. 2004. Recuperación de la productividad de suelos degradados mediante el subsolado y el agregado de yeso. Actas del XIX Congreso Argentino de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Paraná. Entre Ríos. Argentina.

Monnier, G.; P. Stengel; J.C. Fies. 1973. Une methode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux: application a l'analyse des systemes de porosité du sol. Ann. Agron. 24:533-545.

Morrás, H.; C. Irurtia; C. Ibarlucea; M. Lantin; R. Michelena. 2001. Recuperación de suelos pampeanos degradados mediante siembra directa y subsolado. Siembra Directa II.Eds. J.L. Panigatti et al. pp: 263-278.

Moschini, R.C.; H.A. Conti; R. Giagnoni; G. Cazenave. 2006. Caracterización Climática del área de Salto y Las Rosas.

Mullins, G.L.; C.H.Burmester; D.W.Reeves. 1997. Cotton response to in-row subsoiling and potassium fertilizer placement in Alabama. Soil and Tillage Res. 40: 145-154.

Norrish, K. ; B. W.Chappell. 1977. X-ray Fluorescencespectrometry. In: Physical methods in determining mineralogy. Zussman, J., ed. 2nd ed. Acadmic Press. Inc. pp 201-272.

Oliveira, E.L.; M.A. Pavan. 1996. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production.Soil Till. Res.38:47-57.

Orellana, J.A. de. 1989. Expansibilidad y penetrabilidad de un horizonte B2t con enmiendas cálcicas. Ciencia del Suelo 7:107-111.

Orellana, J.A.; J.M. Diez. 1988. Efecto de bajas dosis de cal sobre propiedades mecánicas del Bt de un Argiudol. Rev.FAVE 3; 80-91.

Orellana, L.; J.C. Soto; M.A. Arrechea. 1986. Aparato para el estudio de la distribución de las raíces en el perfil del suelo. Actas XI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Neuquén - Río Negro.

Pavan, M.A.; F.T. Bingham; P.F. Pratt. 1984. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium and aluminium following lime or gypsum applications to a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 33-38.

Peech, M.; L.T. Alexander; L.A. Dean; J.F. Reed. 1947. Methods of soil analysis for soil fertility investigations. U.S. Dept. Agr. 757, 25 pp.

Peinemann, N.; M. Díaz Zorita; M. Villamil; H. Luzarreta; D. Grunewald. 1998. Consecuencias del riego complementario sobre propiedades edáficas de la llanura pampeana. *Ciencia del Suelo I-* 16: 39-42.

Pilatti, M. A. ; R. Antille. 1985. Labores profundas en Argiudoles del NE santafecino: Incidencias sobre las propiedades edáficas y el comportamiento del girasol. *TecniCREA* 5:16-22, Buenos Aires, Argentina.

Porta, J.; M.López; C.Roquero. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 929 pp.

Priano, L.J.J.; D.A. Grenón; J.A. de Orellana. 1986. Propiedades químicas que condicionan la estructura edáfica. *Actas XI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo:* 14-15. Neuquén.

Puricelli, C.A.; A. Legasa. 1973. Remoción de capas u horizontes endurecidos de un Brunizem. INTA EEA Marcos Juárez, Informe Técnico 8 pp. Cia. Córdoba-Argentina.

Quiroga, A.; O. Ormeño; N. Peinemann. 1998. Efectos de la siembra directa sobre propiedades físicas de los suelos. *Siembra Directa* Eds: Panigatti, J.L.; H. Marelli; D. Buschiazzi; R. Gil: pp.57-63.

Radcliffe, D.E.; R.L. Clark; M.E. Sumner. 1986. Effect of gypsum and deep-rooting perennials on subsoil mechanical impedance. *SSSAJ* 50:1566-1570.

Radford, B.J.; D.F. Yule; D. Mc Garry; C. Playford. 2001. Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. *Soil Tillage Res.* 61: 3-4, 157-166.

Richards, L. 1970. Suelos salinos y sódicos. Diagnóstico y rehabilitación. Centro Regional de Ayuda Técnica. Manual de Agricultura nº 60. 172 pp.

Richards, J.E.; G.C. Misener; P. Milburn; L.P. McMillian. 1995. Incorporation of limestone into naturally compacted subsoil during deep-ripping. *Soil and Tillage Res.*36: 21-32.

Rivero, E.; R. Casas; R. Michelena; S. Quiroga; N. Abbiati; D. Lustig. 2000. Influencia de las enmiendas cálcicas y fertilizante en la dinámica de micronutrientes y azufre en suelos de diferentes texturas. *Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Mar del Plata.

Rollán, A.A.; M.S. Karlin; O.A. Bachmier. 2004. Siembra directa y densificación subsuperficial en molisoles del centro-norte de Córdoba. *XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Paraná. P.47.

Sánchez Girón, V.; E. Andreu; J.L. Hernanz. 1998. Response of five types of soil to simulated compaction in the form of confined uniaxial compression tests. *Soil & Till.Res.* 48: 37-50.

Santamarina, J. C.; K. A. Klein; Y.H. Wang; E. Prencke. 2002. Specific surface: determination and relevance. *Can. Geotech J.*, 39: 233-241.

SAS, 1989 SAS Institute Inc. 1989. *SAS/STAT User's Guide*, version 6, vol. 2, fourth ed.

Sasal, M.C. 2004. Cualidades del sistema poroso que condicionan la dinámica del agua bajo Siembra Directa continua en Argiudoles de la Pampa Ondulada. Evaluación de la introducción del nabo forrajero en la rotación agrícola para recuperar horizontes degradados por compactación. Tesis de Master en Ciencia del SUELO. UBA.

Sasal, MC.; AE. Andriulo; M.A. Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian pampas. Soil Till. Res. 87(1):9-18.

Shainberg, I.; M.E. Sumner; W.P. Miller; M.P.W. Farina; M.A. Pavan; M.V.Fey. 1989. Use of gypsum on soils: a review. Advances in Soil Science, 9: 1-111.

Shanmuganathan, R.T.; J.M. Oades. 1983. Modification of soil physical properties by addition of calcium compounds. Aust. J. Soil Res. 21: 285-300.

Skoog, D.A. ; J.J. Leavy. 1994. Análisis instrumental. Mc Graw Hill – Interamericana de España. Madrid. 935 pp.

Smucker, A.J.M.; S.L.M cBurney; A.K. Srivastava. 1982. Quantitative separation of roots from compacted soil profiles by hydropneumatic elutriation system. Agron. J. 74: 500-503.

Soil Reaction Commite Intern. 1930. pH en agua(1:2.5). Soc. Sci. Soil Res. 2:241(6).

Soil Survey Manual. 1951. S. Dept. Agr. Handb. No18 ,503 pp.,illus. Washinngton, p.343.

Steed,G.R.; T.G.Reeves; S.T.Willatt. 1987. Effects of deep ripping and liming on soil water deficits, sorptivity and penetrometer resistance. Australian Jour. Of Experimental Agriculture 27-5: 701-705.

Sumner, M.N.; H. Shahandeh; J. Bouton; J. Hammel. 1986. Amelioration of an acid soil profile through deep liming and surface application of gypsum. Soil Sci. Soc. Am. J. 50:1254-1258.

Sumner, M.E. 1993. Gypsum and acid soils: The world scene. Adv. in Agronomy, Vol. 51:1-32.

Swain, R.W. 1975. Effective subsoiling. In: Soil Physical Conditions and Crop Production. Tech. Bull. 29, MAFF, HMSO- London pp.189-204.

Twomlow, S.J.; R.J. Parkinson; I. Reid. 1994. Temporal changes in soil conditions after deep loosening of a silty clay loam in SW England. Soil Till. Res. 31 (1994), pp. 31-47.

Unger, P.W. 1993. Paratill effects on loosening of a Torric Paleustoll. Soil and Tillage Research, 26: 1-9.

USDA. 1975. Soil Taxonomy. A Basic system of soil classification for working and interpreting. Soil Survey 2nd Edition. United States Government. Printing Office. Washington DC. USA.

Varsa, E.C.; S.K. Chong; J.O. Abolaji; D.A. Farquhar; F.J. Olsen. 1997. Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn root growth and production. Soil and Tillage Res. 43: 219-228.

Velykis, A. 2000. Effect on subsoiling on agrophysical properties of compacted clay loam soil. Adv. GeoEcology 32: 325-330.

Venialgo, C.; O. Ingaramo; S. Ibaló; M.F. Roldán; G. Banzhaf; N.C. Gutiérrez. 2004. Índice de cono, humedad presente y densidad aparente en diferentes labranzas y rotaciones. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná. p. 315.

Walkley, A.; I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining the soil organic matter and proposed modification of the chromic titration method. Soil Sci., 37: 29-38.

Wallace, B.H.; L.D. Norton; R. Woodward. 2001. Erosion control by amending soil with synthetic gypsum. In Stott, Mohtar and Steinhardt (eds.).Sustaining the global farm. ISCO. Pp 1158-1162.

Wallace-Cochrane, B.; J.M. Reichert; F.L. Eltz; L.D. Norton. 2004. Controlling soil erosion and runoff with Polyacrylamida and Phosphogypsum on subtropical soil. Transactions of the American Society of Agricultural Engineering. Vol. 48(1): 149-154.

Weir, E.; C.A.Puricelli. 1978. Crecimiento irregular de los cultivos producido por el mal manejo del suelo. INTA- EEA Marcos Juárez- Inf.Téc n° 8.

Whittig, L.D.; W.R. Allardice. 1986. X-ray Diffraction techniques. In: In: Methods of Soil Analysis, part 1 Klute, A., ed. ASA-SSSA. pp 331-362..

Willis,T.W.; D.J.M. Hall; D.C. McKenzie; I. Barchia. 1997. Soybean yield as affected by crop rotations, deep tillage and irrigation layout on a hardsetting Alfisol. Soil and Tillage Res. 44: 151-164.

Wilson, M.G. 2007. Uso de la tierra en el área de bosques nativos de Entre Ríos, Argentina. Tesis Doctoral. Universidad de La Coruña.

Publicación en INTERNET:

Mon, R.; C.B. Iruetia. 2002. Recuperación de la productividad de suelos degradados mediante el subsolado con agregado de yeso.

<http://www.insuelos.org.ar/informes>.

Mon, R.; C.B. Irurtia. 2002. Chemical and physical soil properties as influenced by supplementary irrigation in pampean region.
<http://www.insuelos.org.ar/informes>