



UNIVERSIDAD
DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO
DE QUÍMICA
AGRÍCOLA Y
EDAFOLOGÍA

TESIS
DOCTORAL



ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HÍDRICO EN ZNS (ZONA NO SATURADA) DE UN VERTISOL DEL VALLE MEDIO DEL GUADALQUIVIR

Beatriz Lozano García

TITULO: *Estudio del comportamiento hídrico en ZNS (Zona No Saturada) de un vertisol del valle medio del Guadalquivir*

AUTOR: *BEATRIZ LOZANO GARCIA*

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2009
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es

ISBN-13: 978-84-7801-972-4
D.L.: CO 1280-2009



**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS**

TESIS DOCTORAL



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HÍDRICO EN
ZNS (ZONA NO SATURADA) DE UN VERTISOL DEL
VALLE MEDIO DEL GUADALQUIVIR**

BEATRIZ LOZANO GARCÍA

Córdoba, abril de 2008

Tesis Doctoral presentada por:

Dña. Beatriz Lozano García

Directores

Dr. D. Luis Parras Alcántara

Dr. D. José Luis Muriel Fernández

A Bernabé, mi marido y a
nuestros hijos, Álvaro y el
que está a punto de nacer.

AGRADECIMIENTOS

El día que defendí la Tesis de Licenciatura los nervios me hicieron preguntarme por qué me había metido en esto de la investigación, lo cierto es que cinco años después me encuentro a punto de defender la Tesis Doctoral. La respuesta a aquella pregunta imagino que como todo el mundo, “porque esto me gusta”, me gustan los retos y sentirme capaz de resolverlos ya que con paciencia todo llega y en estos años en el Departamento además de los conocimientos científicos adquiridos he ganado buenas dosis de paciencia.

Así que me alegra mucho llegar a este apartado de agradecimientos por dos motivos: en primer lugar porque lo he relegado al último lugar y, por tanto, la Tesis ya está escrita y estoy terminando una etapa importante que me parecía muy lejana en el tiempo y, en segundo lugar, porque echo la vista atrás para recordar a todas las personas que me han ayudado y me emociono, desde estas páginas quiero agradecer su esfuerzo.

Quiero agradecer a los directores de este trabajo, Dr. D. Luis Parras Alcántara y Dr. D. José Luis Muriel Fernández, su esfuerzo y dedicación. Ellos me han guiado en el camino de la investigación con sus conocimientos, su tiempo y su comprensión. Han sabido animarme en los momentos de duda y han confiado en mí desde el principio.

Al igual que al otro guía fundamental de este trabajo y que merece un agradecimiento especial, el Dr. D. Luis Corral Mora, que además me ha tratado como a otra hija.

A todos los miembros del departamento de Química Agrícola y Edafología de la Universidad de Córdoba por la ayuda prestada en cualquier momento, en especial a Juan Gil, Concha Benítez, José Luis González, Manolo Molina y Pepe Navajas.

A Julia Barrios por su colaboración en el tema de las arcillas, a Antonio Jesús por ser mi guía en temas estadísticos y a Álvaro por resolverme los problemas informáticos.

Al IFAPA por las facilidades prestadas para en el uso de la Finca Experimental Tomejil para la realización de los trabajos de esta Tesis Doctoral, especialmente Paco Perea por su inestimable ayuda.

A la Universidad de Córdoba por la beca disfrutada y gracias a la cual ha sido posible el desarrollo de este trabajo.

A Bernabé, mi marido, su ayuda ha estado presente en todas las etapas de esta Tesis, en el diseño de las cajas, en la parte experimental y en estos últimos meses de agobios. A Álvaro, mi hijo, que desde el vientre materno me acompañó todos los días a regar las

muestras y extraer solución del suelo y una vez en este mundo se ha portado como un campeón y ha dejado a mamá llevarse el trabajo a casa. Y a mi otro hijo, al que estoy gestando, y ha estado presente en las últimas etapas de la Tesis.

A Juan y Araceli, mis padres, y Óscar, mi hermano, por su confianza y preocupación por mi trabajo.

A Miguel y Rosario, mis suegros, por dejarme su finca para poder instalar las muestras y hacer allí la parte experimental.

A todos y cada uno ¡GRACIAS DE TODO CORAZÓN!

OBJETIVOS

OBJETIVOS

Ante los nuevos planteamientos agrícolas y medioambientales los procesos de conservación agroambiental de suelos van ganando importancia, constituyen la base de las medidas agroambientales, sin embargo está todavía poco desarrollado el proceso de conocimiento del comportamiento de las “unidades suelo” ante estas variaciones culturales y sobre todo existen pocas explotaciones agropecuarias, con una experiencia de más de veinte años, en parcelas experimentales sobre el mismo tipo de suelo. Las denominadas “Tierras Negras Andaluzas” según Kubierna (1953), constituyen la mayoría de las tierras agrícolas de Campiña baja de Andalucía, ocupando casi un millón de hectáreas (de la Rosa y Moreira, 1987), por lo que, toda información científica sobre su nivel y posibilidades de manejo es de vital importancia para la agricultura extensiva de esta Comunidad Autónoma.

Por lo que los objetivos generales y particulares que se han planteado son:

- Análisis y comparación de propiedades y comportamiento físico-mecánico-químico y mineralógico de los Vertisoles Topolitomorfos, con respecto a los distintos niveles de manejo agrario.
- Haciendo especial hincapié en lo relativo a la saturación en agua y a la estimación de los procesos de lavado, en las distintas técnicas (laboreo convencional, mínimo laboreo y siembra directa) hasta ahora en la revisión bibliográfica realizada, no se ha intentado en suelos de textura fina (por las dificultades propias de estos suelos). Por lo que, uno de los objetivos principales, será el diseño y puesta a punto de un método de extracción que facilite que el suelo permanezca inalterado, ante los diferentes episodios de riego extracción de solución del suelo.
- El estudio de la dinámica de Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-} en la solución del suelo, después de la saturación de éste, en el tiempo; además del análisis y evaluación de la solución extraída en las diferentes técnicas de cultivo, para determinar que práctica agrícola debe ser la más favorable (o menos agresiva) para la conservación del suelo y el desarrollo de la cosecha.
- Aplicación de un Análisis de Varianza (ANOVA) a los datos obtenidos, con el fin de extraer conclusiones sobre reconocimiento de dependencia o no, de la presencia y/o concentración de los diferentes nutrientes estudiados con respecto a la técnica de cultivo.

ÍNDICE

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
	I.1. Localización y caracterización de la zona de estudio	1
	I.2. Vertisoles.....	8
	I.2.1. Ecología de los Vertisoles.....	9
	I.2.2. Morfología y caracteres físico-químicos	9
	I.2.3. Propiedades agronómicas: influencia sobre nutrición de las plantas..	10
	I.3. Arcillas.....	11
	I.3.1. Principios estructurales y origen de la carga negativa	11
	I.3.2. Tipos principales de arcillas.....	12
	I.4. Degradación hídrica.	17
	I.5. Agricultura de Conservación.....	18
	I.6. Zona no Saturada.	25
	I. 7. Absorción de elementos nutritivos por las plantas.	27
	I. 8. Elementos esenciales.....	28
	I.9. Potasio.	29
	I.10. Sodio.....	30
	I.11. Calcio.....	31
	I.12. Magnesio.....	32
	I.13. Azufre.	33
	I.14. Cloro.....	34
II.	MATERIAL Y MÉTODOS	35
	II.1. Estudio del suelo	35
	II.1.1. Descripción de los perfiles	36
	II.1.2. Determinaciones analíticas del suelo	39
	II.1.3. Determinación de arcillas. Difracción de rayos X.....	44

II.2. Diseño de la experimentación.....	46
II.2.1. Toma y preparación de las muestras inalteradas de suelo	46
II.2.2. Equipo extractor. Tomamuestras de succión de teflón-cuarzo.....	54
II.2.3. Time Domain Reflectometry (TDR).....	59
II.3. Estudio de la solución del suelo	63
II.3.1. Toma y preparación de las muestras de solución del suelo.....	63
II.3.2. Determinaciones analíticas de la solución del suelo.....	63
II.4. Análisis estadístico de la solución del suelo	66
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
III.1. Estudio del suelo	71
III.1.1. Descripción de los perfiles.....	71
III.1.2. Resultados analíticos	77
III.1.3. Arcillas	81
III.2. Resultados de la experimentación	83
III.3. Resultados del análisis estadístico.....	84
III.3.1. Cationes monovalentes	86
III.3.1.1. Sodio	86
III.3.1.2. Potasio	97
III.3.1.3. Comparativa de los cationes monovalentes	107
III.3.2. Cationes divalentes	108
III.3.2.1. Calcio	108
III.3.2.2. Magnesio	118
III.3.2.3. Comparativa de los cationes divalentes	125
III.3.3. Aniones	126
III.3.3.1. Bicarbonatos	126
III.3.3.2. Sulfatos	135
III.3.3.3. Cloruros.....	142
III.3.3.4. Comparativa de aniones	148
III.4. Resultados del análisis de metales pesados.....	149

IV. CONCLUSIONES	151
V. ANEXOS	153
VI. BIBLIOGRAFÍA	169

I. INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN.

I.1. Localización y caracterización del área de estudio.

Este trabajo se ha centrado en la finca experimental Tomejil, situada en la campiña de Carmona, Sevilla ($37^{\circ} 24' 07''$ N $5^{\circ} 35' 10''$ W) a una altitud de 79 m.s.n.m., perteneciente al IFAPA (Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica) Las Torres-Tomejil, dependiente de la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía (Imagen I.1).



Imagen I.1. Vista de la Finca Experimental Tomejil.

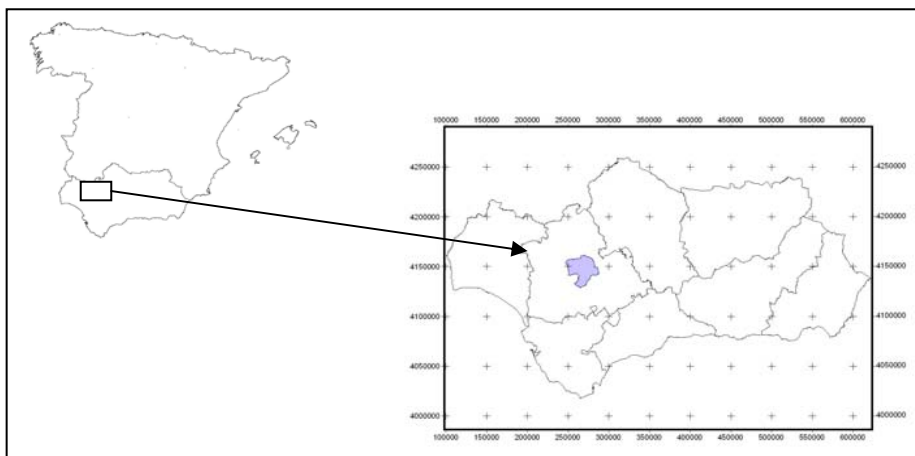


Imagen I.2. Localización de Carmona.

Carmona ha constituido desde la antigüedad uno de los enclaves preferenciales de las primeras poblaciones que ocuparon la zona del bajo Guadalquivir, la razón es obvia si se tiene en cuenta su especial situación geográfica y estratégica (Imagen I.2), que le ha permitido controlar las principales vías de comunicación del Valle del Guadalquivir. Ubicada en el centro de la provincia de Sevilla, ocupa una superficie de 924 km² en la que se pueden diferenciar tres elementos fisiográficos que determinan las fuentes de recursos naturales de la zona: los alcores, las terrazas y la campiña o vega (Perea y González, 2005) (Ver Imagen I.3).

Los alcores (franja estrecha y amarilla de la imagen I.3) constituyen una franja alargada en dirección NE-SO con una longitud aproximada de unos 30 km, entre la margen izquierda del río Corbones y el río Guadaira al que atraviesan en su sector meridional, siendo la anchura desigual, con menos de 1 km al norte de Carmona, por unos 10 km en las inmediaciones de Alcalá de Guadaira (Baena, R., 1993).

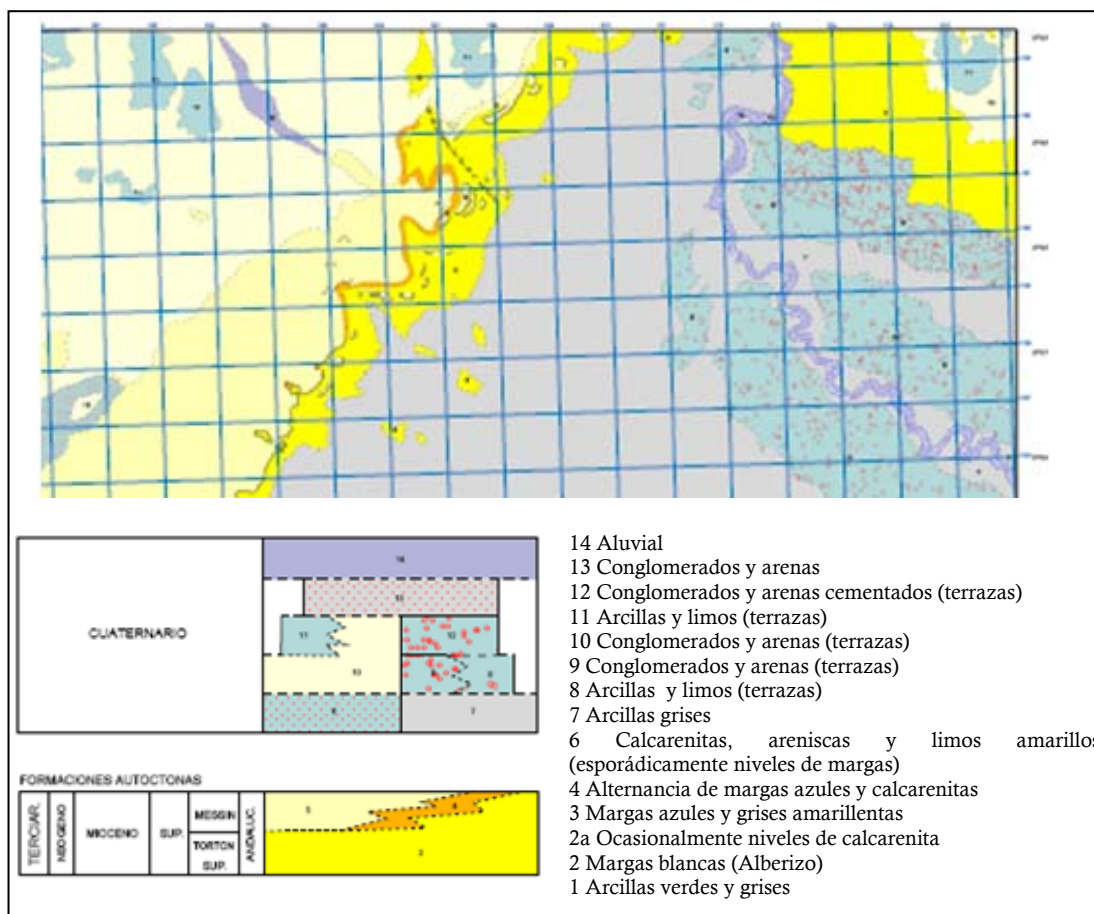
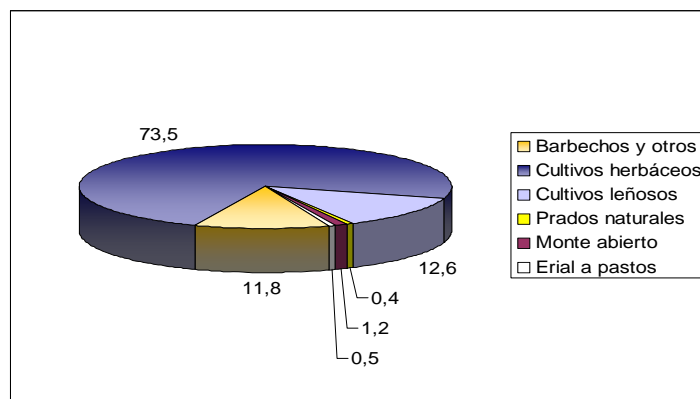


Imagen I.3. Mapa geológico de la zona, donde se distinguen los tres elementos fisiográficos. Fuente IGME.

Esta formación constituye un afloramiento Neógeno, de finales del Plioceno, durante la Era Cenozoica, formada por calcarenitas masivas amarillentas con gran cantidad de restos fósiles que corresponden a depósitos marinos en una cuenca somera durante el Mioceno, hace 25 millones de años (Perea y González, 2005).

Geológicamente los alcores conforman un relieve estructural monoclinal, es decir, formados por bloques que basculan hacia el mismo sentido, que se caracterizan por su marcado escarpe, su sismicidad y la presencia de un acuífero de gran interés (Rodríguez J. y González, I. 1987). Este afloramiento divide el tramo central de la depresión inferior del Guadalquivir, separando las restantes unidades geográficas diferenciadas en la zona estudiada: una al NO, constituida por el aluvial del Guadalquivir (terrazas), formadas básicamente por limos y cantos rodados y la otra al SE, representada por la zona deprimida de la vega de Carmona, formada por margas arcillosas.

Es evidente que Carmona es una ciudad que posee como pieza fundamental de su tejido productivo la explotación de sus recursos agrícolas, donde destaca, sin lugar a dudas, la riqueza de los suelos que componen su campiña. Posee uno de los términos más extensos de la provincia de Sevilla (924 km²), donde el aprovechamiento fundamental del suelo se destina a cultivos herbáceos extensivos, sobre todo cereal y girasol, que suponen un porcentaje aproximado del 73%, y a cultivos leñosos con el 12,6% (Perea y González, 2005) (Gráf. I.1).



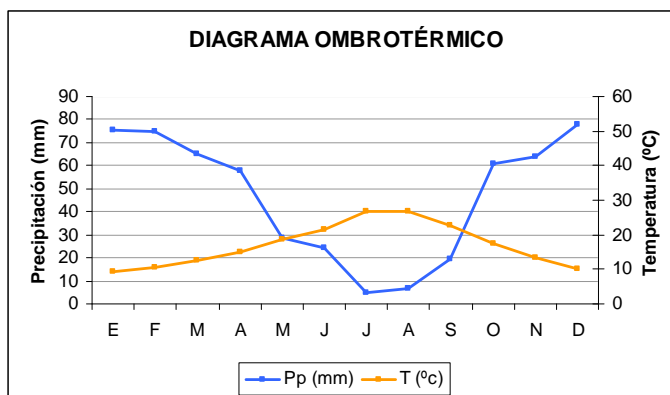
Gráf. I.1. Distribución porcentual de los aprovechamientos del suelo en Carmona.

Es interesante destacar que los suelos de la campiña constituyen las tierras típicas del cultivo de secano en Andalucía. Son suelos arcillosos conocidos como “tierras negras” o “bujeos”, pertenecen al orden vertisol, de marcado carácter xérico, de aquí su pertenencia al suborden xererts, dado que se abren y cierran grietas una vez cada año, permaneciendo abiertas durante sesenta o más días (SCS, 1975, cap. 17) (Imagen I.4).



Imagen I.4. Vertisoles de la Finca Experimental Tomejil.

Desde el punto de vista climatológico, esta zona presenta dos características que la definen: larga sequía estival y fuerte irregularidad en la distribución de las precipitaciones. Todo ello junto con las altas temperaturas registradas durante el verano provoca un carácter negativo a la actividad agrícola, tal y como se puede ver en el diagrama ombrotérmico (Gráf. I.2).



Gráf. I.2. Diagrama ombrotérmico de Gausсен.

Las precipitaciones constituyen el factor esencial que más limita la producción de este tipo de agricultura de secano, de tal forma que la zona se caracteriza por tener poca diversidad de cultivos, destacando fundamentalmente los cereales, sobre todo, trigo, oleaginosas como el girasol y algo de leguminosas, garbanzos y habas, aunque en pequeñas proporciones.

La precipitación media, a partir de una serie de datos recogidos durante 30 años (SINAMBA, 1996 y Perea, 2004), es de 529,35 mm. Precipitaciones que serían suficientes para este tipo de cultivos herbáceos si estuviesen distribuidas de forma uniforme. La amplitud térmica oscila entre 41,5 °C y -3 °C, siendo la media anual de 19 °C.

En función de las precipitaciones caídas a lo largo del año (como fuente de agua) y las temperaturas (como indicador de la energía disponible para evaporar) el índice de aridez de Lang (1915) clasifica la vega de Carmona como una zona árida (Tabla I.1) y utilizando el índice de Emberger (1930) para sintetizar el clima mediterráneo, Carmona se caracteriza por un clima mediterráneo semiárido con vegetación natural de olivo, alcornoque y lentisco con heladas muy frecuentes (Tabla I.1).

Atendiendo al estudio de la influencia del océano en el clima, Carmona presenta características de muy continental según los índices de Gorczynski (1920) y Kerner (1905) (Tabla I.1).

ÍNDICE	VALOR
de Lang	30,96
de Emberger	40,70
de Gorczynski	105,68
de Kerner	5,84

Tabla I.1. Valores de los diferentes índices climáticos para Carmona (elaboración propia).

Todo ello que indica que la finca Tomejil se encuentra en una zona caracterizada por tener un clima mediterráneo-continental con veranos tórridos, factor que limita en gran manera los cultivos de verano, e inviernos frescos, que favorecen incluso el cultivo de cereales de invierno (Perea, 2004).

Por este motivo los valores de ETP mensuales son elevados en los meses de verano, moderados en primavera y otoño y bajos en invierno (graf. I.3), a partir de estos valores y de los de precipitación mensual y reserva del suelo (como agua disponible para ser devuelta a la atmósfera) se determina la evapotranspiración real mensual (ETR). Todos estos datos son plasmados en la ficha hídrica (gráf. I.3 y tabla I.3).

La clasificación de Thornthwaite (1948) define unos tipos de humedad, basados en un índice hídrico anual (Im) que combina dos índices, uno de humedad (Ih) y otro de aridez (Ia), y que están representados por letras mayúsculas y su variación estacional (letras minúsculas), y otros tipos según la eficacia térmica, ETP, (letras mayúsculas con comilla) y su concentración estival (c) (letras minúsculas con comilla).

En la tabla I.2 se muestran los valores entre los que oscilan el Índice de Humedad (Ih), el Índice de Aridez (Ia), el Índice Hídrico Anual (Im), ETP y la concentración estival de la eficacia térmica, para las tres parcelas.

Ih	Ia	Im	ETP (mm)	C (%)
0,92 – 1,19	37,45 – 37,72	-1,33 – (-1,07)	883,53	50

Tabla I.2. Valores de los índices de la clasificación de Thornthwaite (elaboración propia).

Después del análisis de estos datos se puede clasificar la zona como Seca Subhúmeda según el Índice Hídrico Anual. En cuanto a la Eficacia térmica, basada en la ETP, cabe decir que Tomejil se sitúa en una zona Mesotérmica III, con falta de agua en el suelo grande en Verano (s2), y con una Concentración Estival de la Eficacia Térmica (relación en tanto por ciento de la ETP de los meses de Julio, Agosto y Septiembre con la anual) de 50%. De esta forma la clasificación de Tomejil según Thornthwaite es C₁B₃'s₂b₄'.

Suelo: **Vertisol cálcico** (FAO, 1998).

Estación pluviométrica: **Tomejil**.

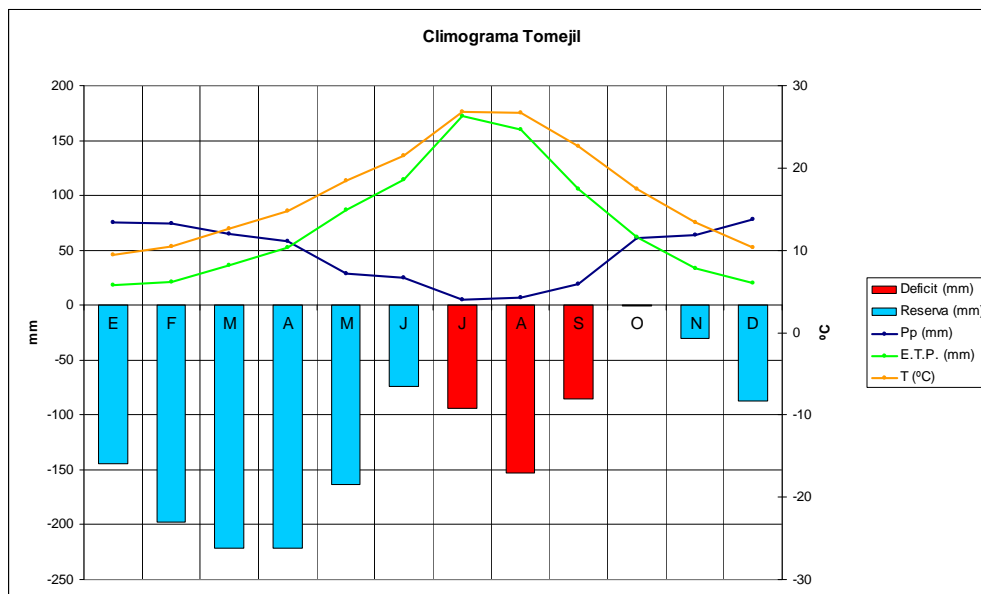
Altitud **79 m**. Latitud **37° 24' 07'' N**. Longitud **5° 35' 10'' O**

Reserva: **221,1 mm**.

Clasificación: **C₁ B₃' s₂ b₄'**. **Seco Subhúmedo Mesotérmico III**

MESES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
T (°C)	9,4	10,5	12,6	14,8	18,5	21,5	26,8	26,7	22,7	17,4	13,4	10,3	17,1
Pp (mm)	75,4	74,8	65,3	57,8	28,8	24,5	5,1	6,9	19,6	60,8	63,8	78,0	560,8
ETP (mm)	18,2	21,6	36,8	52,3	86,6	114,2	172,2	160,1	105,4	61,7	33,9	20,6	883,6
ETR (mm)	18,2	21,6	36,8	52,3	86,6	114,2	78,7	6,9	19,6	60,8	33,9	20,6	550,2
V.													
Reserva (P-ETP)	57,2	53,2	28,5	5,5	-57,8	-89,7	167,1	153,2	-85,8	-0,9	29,9	57,4	
Reserva	144,5	197,7	221,1	221,1	163,3	73,6	0	0	0	0	29,9	87,3	
Exceso	0	0	5,1	5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	10,6
Déficit	0	0	0	0	0	0	93,5	153,2	85,8	0,9	0	0	333,4

Tabla I.3. Ficha hídrica.



Gráf. I.3. Climograma.

I.2. Vertisoles.

Los vertisoles son suelos de color oscuro y ricos en arcillas expansibles. Los agregados arcillo-húmicos de los vertisoles son de un tipo muy particular, están formados por un complejo constituido por arcillas expansibles y compuestos húmicos oscuros fuertemente unidos entre sí que son difíciles de disociar por los medios físico-químicos habituales.

Además los vertisoles se caracterizan por:

- abundancia de arcillas expansibles neoformadas o heredadas del material;
- turnover rápido de las fracciones más lábiles de la materia orgánica; la fracción “estable”, de color oscuro (poco abundante, por otra parte), es la única que perdura en el perfil;
- mezcla mecánica del conjunto de los horizontes por los “movimientos vérticos”, ligados a las variaciones periódicas del volumen de la arcilla, lo que provoca la homogeneización casi completa del perfil (Imagen I.5);
- estructura generalmente muy gruesa, formada por prismas separados entre sí por amplias “grietas de retracción” en los períodos secos (Imagen I.6), y abundancia de “superficies de fricción” (slickensides), prueba de la existencia de los movimientos vérticos. (Duchaufour, 1984).



Imagen I.5. Restos de cultivos anteriores en profundidad, como consecuencia de la mezcla mecánica típica de estos suelos.



Imagen I.6. Grieta de retracción en un vertisol de este estudio.

I.2.1. Ecología de los vertisoles.

Los vertisoles se localizan en zonas climáticas muy contrastadas, que tienen la particularidad de presentar un acusado período seco (Dudal, 1967). Sin embargo, para alcanzar su pleno desarrollo, es necesaria la existencia de condiciones particulares, principalmente de topografía y de material: estaciones con mal drenaje local interno o externo, que, desde el punto de vista del edafoclima del suelo, acentúan los contrastes estacionales del clima general. Se trata, generalmente, de depresiones colmatadas por un material arcilloso, rico en calcio y en magnesio, cationes indispensables para la neoformación de las arcillas expansibles ricas en sílice (esmeclitas); en estas condiciones particulares del medio, el perfil pasa rápidamente, según las épocas, de unas condiciones de fuerte hidromorfia, por “encharcamiento” total de los poros capilares, a una desecación muy acusada del conjunto de los horizontes: todas las propiedades morfológicas, físicas, bioquímicas y mineralógicas de los vertisoles se explican por estos contrastes del edafoclima (Duchaufour, 1984).

I.2.2. Morfología y caracteres físico-químicos.

Las variaciones climáticas y, fundamentalmente, las oscilaciones estacionales del estado de humedad son las que condicionan los fenómenos de dilatación y contracción que caracterizan a los suelos de naturaleza vértica; ya que al tener estos suelos elevados contenidos en arcilla de naturaleza esmeclítica, que posee la propiedad de admitir moléculas de agua en su estructura, originan fenómenos de dilatación en los períodos húmedos, mientras que en los períodos secos se produce el fenómeno contrario, es decir, pérdida de agua y contracción de la masa de suelo (Ahmad y Mermut, 1996).

La dinámica vértica, favorecida por los cambios estacionales (climáticos) de las condiciones de humedad del suelo, hace que estos fenómenos sean de una gran importancia para la génesis, clasificación y uso de estos suelos en condiciones mediterráneas. Más concretamente en Andalucía, por ser unos suelos de amplia distribución que están dedicados fundamentalmente al cultivo de cereales y leguminosas, como han puesto de manifiesto Asensio (1993) y Ortega (1993).

Por regla general, la estructura característica de los vertisoles sólo es bien visible en los períodos secos: el horizonte B se caracteriza por la presencia de grietas de retracción verticales y más o menos anchas (a veces de 1 a 5 cm) que delimitan grandes prismas; más abajo, este horizonte es sustituido por un horizonte BC, con una estructura más irregular, donde predominan los “slickensides”, grandes superficies de fricción oblicuas, provocadas por los movimientos vérticos (Duchaufour, 1977); se observa también con frecuencia, en la base de este horizonte, la presencia de concreciones calizas formadas por precipitación de los bicarbonatos arrastrados desde la superficie, u oblicuamente a lo largo de la pendiente. Estas concreciones calizas no sólo se forman sobre material cristalino o eruptivo sino también sobre material sedimentario.

A pesar de la poca cantidad de materia orgánica (aproximadamente un 2% distribuido de forma homogénea en el perfil), el color general es oscuro, con frecuencia negro, debido a la calidad de esta materia orgánica muy evolucionada: el C/N es del orden de 14 a 15. Las arcillas

expansibles (esmeclitas), mezcladas a menudo con una pequeña cantidad de ilitas e interestratificados, representan del 40 al 60% de la masa total; estas arcillas imprimen al perfil la mayor parte de sus propiedades físicas y químicas y en particular provocan, por la alternancia de su expansión y de su retracción, los movimientos vérticos y la frecuente aparición en superficie de un microrrelieve amamelonado, llamado “gilgai”; asimismo, la elevada capacidad de cambio catiónico, de 40 a 80 meq por 100 g, constituida sobre todo por cargas “permanentes” se debe casi exclusivamente a la abundancia de arcillas expansibles. (Duchaufour, 1984).

I.2.3. Propiedades agronómicas: influencia sobre la nutrición de las plantas.

Aunque los vertisoles poseen una fertilidad química elevada, a menudo las propiedades físicas son desfavorables debido a la excesiva cantidad de arcillas expansibles y al régimen hídrico, acompañado de ciclos de expansión – contracción (Cerana, et al., 2005). Los movimientos vérticos y la profunda fisuración del suelo que tiene lugar en los períodos secos, producen efectos muy desfavorables: ruptura de las raicillas absorbentes, desecación profunda del perfil, compactación y aumento de la densidad aparente; el suelo es difícil de trabajar durante un largo período, bien porque está encharcado por el agua, bien porque está fuertemente endurecido en los períodos secos (Duchaufour, 1984).

Aunque los vertisoles pueden almacenar gran cantidad de agua, el rango aprovechable es muy pequeño, debido a los problemas de aireación, resistencia a la penetración y a la escasa profundidad efectiva de enraizamiento que pueden alcanzar los cultivos. Son susceptibles a la compactación, en particular cuando las operaciones de campo son realizadas con altos contenidos hídricos. Sin embargo en muchos casos, dichos efectos no son reflejados por el aumento de la densidad del suelo. Estas condiciones han sido estudiadas por Benavidez et al. (2004) tanto en el plano de los horizontes superficiales como en los subsuperficiales.

Según Gardner et al. (1988), las determinaciones de los valores de PAWC (disponibilidad de agua para las plantas) en vertisoles de Queensland en Australia, presentan un amplio margen de oscilaciones, que van desde 100 – 130 mm en condiciones de desecación intermedia y de 70 – 140 mm en condiciones de fuerte desecación. También indican estos autores que existen diferencias importantes en los valores de PAWC en función de la profundidad de enraizamiento y así, Shaw y Yule (1978), expresan que las diferencias en la capacidad de almacenamiento de agua puede variar entre 15 – 22 mm cada 10 cm, en función de la profundidad del suelo y enraizamiento.

La cantidad de agua útil en el suelo es una característica de éste que define su aptitud agrícola y corresponde al agua que puede ser absorbida por las plantas. Su límite está situado entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento. La capacidad de campo varía con la composición textural del suelo; así, en los suelos muy arcillosos, como es el caso de los vertisoles, los valores pueden quedar comprendidos entre el 30 y 40%. Aunque los valores del punto de marchitamiento varían de acuerdo con la especie vegetal y la velocidad instantánea de desecación del suelo, de forma orientativa se puede decir que este punto se sitúa entre el 15 y el 20% de humedad (Pérez et al., 2000).

I. 3. Arcillas.

La fracción arcilla está constituida por las partículas minerales más finas del suelo, éstas son, con un diámetro inferior a 0,002 mm.

I. 3. 1. Principios estructurales y origen de la carga negativa.

El tamaño y forma de las arcillas dependen de su condición mineralógica y de las condiciones bajo las cuales se han originado. Pueden ser hexagonales, planas, alargadas o en forma de capas. En todos los casos, sin embargo, presentan una estructura laminada. La tenacidad de las uniones entre las láminas varía en función del tipo de arcilla de que se trate; en algunos casos esta unión es débil, y al mojarse puede aparecer entre estas unidades una amplia expansión (Navarro, 2000).

La estructura atómica de la mayor parte de las arcillas consiste en láminas formadas por dos componentes básicos: tetraedros de sílice y octaedros de alúmina.

Todas las partículas coloidales de arcillas mantienen en su superficie una amplia carga negativa, esto hace que miles de cationes sean fácilmente atraídos hacia ella, originándose así un complejo coloidal formado por un anión gigante rodeado de cationes sueltos más o menos hidratados. Este enjambre de cationes que acompaña a la partícula coloidal arcillosa en su movimiento está integrado por H^+ o por cationes metálicos, Ca^{2+} , K^+ , y Na^+ principalmente, y en menor proporción por NH_4^+ , Mn^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} . Todos ellos son llamados “de cambio”, ya que pueden participar en un proceso de cambio reversible con cationes que se encuentran en la disolución del suelo (complejo de cambio).

En condiciones habituales, esta electronegatividad se debe a dos tipos de cargas: las permanentes y las variables, ambas de origen distinto (Navarro, 2000).

Las cargas permanentes aparecen como consecuencia de sustituciones isomórficas de átomos de la red cristalina por otros átomos de menor valencia. Estas sustituciones se producen durante el proceso de edafización de los minerales primarios que han dado lugar a las arcillas, creando puntos con densidad de carga eléctrica negativa. Sustituciones de: Si^{4+} por Al^{3+} en la capa tetraédrica; Al^{3+} por Mg^{2+} , o Fe^{2+} en la capa octaédrica; y de Mg^{2+} por Li^+ o K^+ , situados en el interior de la red cristalina son los más frecuentes. Estos reemplazamientos de cationes tetra, tri o di por cationes tri, di o monovalentes originan un déficit de cargas positivas que son compensadas en la superficie de la partícula por cationes.

Evidentemente, la carga negativa libre se manifiesta en la superficie del cristal en forma más o menos intensa según la distancia que exista entre el punto cargado y la superficie: como las capas octaédricas están más lejos de la superficie de las láminas que las tetraédricas, los cationes retenidos por cargas cuyo origen esté en las primeras, lo estarán más débilmente que las correspondientes a las capas tetraédricas.

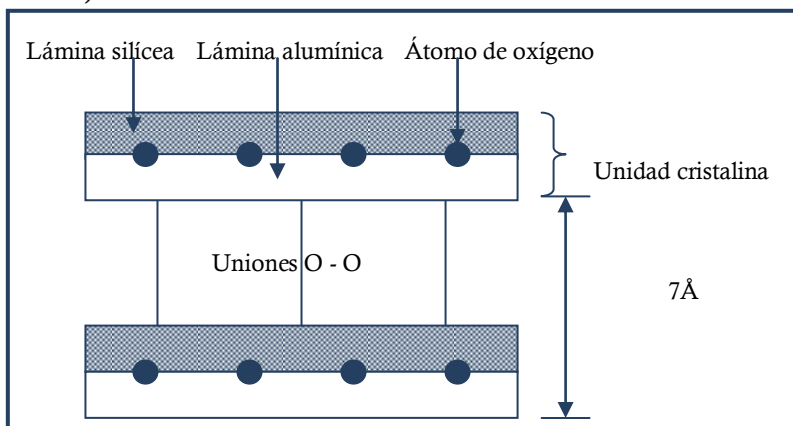
Las cargas variables son debidas a la ionización de los grupos $-OH$ de las superficies y aristas de los cristales arcillosos. El número de estos grupos $-OH$ en una superficie arcillosa determinada sería prácticamente previsible en cristales perfectos. Pero en la práctica, la presencia de cristales rotos, incompletos o asociados, hace que las variaciones dentro de una misma especie arcillosa sean grandes. En todos los casos, el hidrógeno de estos radicales $-OH$ se separa ligeramente y la superficie del cristal queda con una carga negativa que soporta el átomo de oxígeno. Este proceso justifica la mayor parte de la capacidad adsorbente de las arcillas silíceas tipo red 1:1, aunque también puede presentarse en las de tipo 2:1, particularmente en cristales rotos.

I. 3. 2. Tipos principales de arcillas.

La repetición bidimensional de las unidades tetraédricas y octaédricas, el apilamiento de estas láminas según varias combinaciones y, finalmente, las sustituciones isomórficas de unos átomos por otros dentro de la red cristalina, originan los distintos tipos de arcillas. A este respecto, Navarro (2000) establece seis grandes grupos, en los cuales están englobados la mayor parte de los minerales:

➤ *Grupo de la caolinita.*

La caolinita presenta una estructura hojosa, constituida por unidades cristalinas aplanadas. Cada una de estas unidades está a su vez formada por láminas alternadas de sílice y alúmina, unidas entre sí muy estrechamente. Como puede observarse en la gráfica I.4, las dos láminas de cada unidad cristalina están unidas entre sí por átomos de oxígeno que quedan libres en los tetraedros, los cuales resultan compartidos por los átomos de silicio y aluminio en sus planos respectivos. Así se constituye cada unidad cristalina, que se une con otras muy tenazmente por existir enlaces de hidrógeno entre los hidroxilos de una de ellas y los oxígenos de la lámina vecina. Este tipo de estructura se denomina tipo de red 1:1 (una lámina silícea tetraédrica por una lámina aluminica octaédrica).



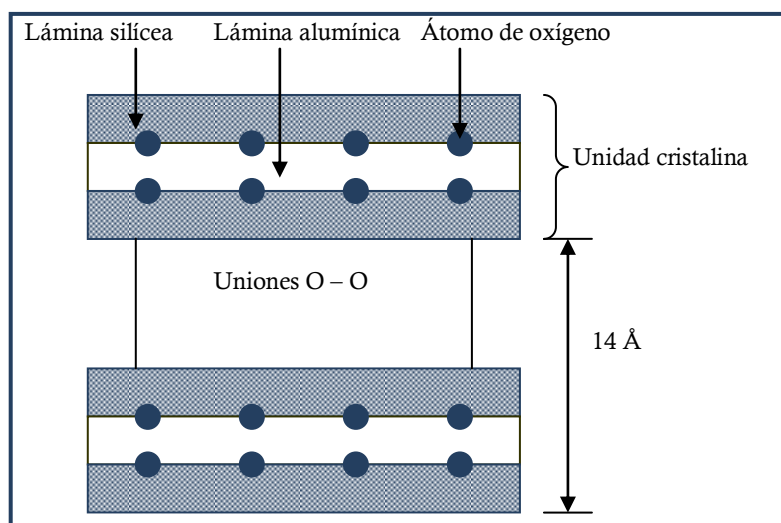
Gráf. I.4. Esquema de la estructura en láminas de la caolinita. La expansión de la red es mínima. No permite la entrada de agua ni cationes.

Se deduce, por tanto, que la red que constituye la partícula arcillosa no permite ninguna dilatación entre las unidades cuando se moja, y ni el agua ni los cationes pueden penetrar en la interfase interna. La única superficie activa es la externa y, por ello, las arcillas de este grupo se caracterizan por su baja capacidad de adsorción y cambio de cationes.

La caolinita no presenta sustituciones isomórficas significativas, por lo que su capacidad de cambio de cationes se debe fundamentalmente a las cargas variables. La capacidad de cambio de cationes de la caolinita puede situarse entre 1 y 15 meq/100g, lo que explica que los suelos con alto contenido en caolinita sean poco fértiles.

➤ *Grupo de la montmorillonita (o esmectita).*

En este grupo las unidades cristalinas están formadas por dos láminas de sílice y una de alúmina, ésta última intercalada y tenazmente unida a las dos de sílice por átomos de oxígeno. Por ello a esta estructura se la conoce como tipo de red 2:1 (dos láminas de sílice tetraédrica por una lámina aluminica octaédrica) (Gráf. I.5).



Gráf. I.5. Esquema de la estructura en láminas de la montmorillonita. Posee una fácil expansión de la red lo que facilita la entrada de agua y cationes.

Estas unidades cristalinas están unidas unas a otras mediante puentes oxígeno-oxígeno. Ello permite a estas arcillas, cuando están mojadas, una expansión amplia de la red y, como consecuencia, la fácil entrada y adsorción de agua y cationes en las superficies internas. Esta adsorción interna es siempre mucho mayor que la externa, ya que tratándose de una estructura laminar, la superficie de las bases es muy superior a la de los bordes, pues la de éstos es muy pequeña debido al escaso grosor de las láminas.

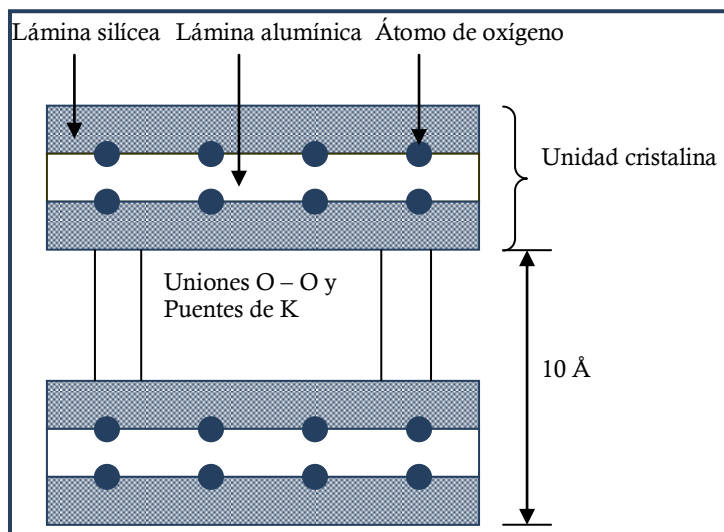
En este tipo de arcillas pueden presentarse sustituciones isomórficas iónicas en la red. La sustitución de Si por Al en la capa tetraédrica y Al por Mg en la capa octaédrica son las más frecuentes. Cuando esto ocurre, las cargas negativas que aparecen en la sustitución son compensadas por cualquier catión intercambiable.

La capacidad de cambio de cationes de la montmorillonita se sitúa entre 80 y 150 meq/100g.

➤ *Grupo de las micas hidratadas (o illita).*

La illita presenta una organización estructural semejante a la montmorillonita, es decir, tipo de red 2:1. Pero como puede verse en la gráfica I.6, hay diferencias en lo que respecta a la fase interlaminar, que repercute notablemente en su capacidad de expansión.

En esta estructura, un cierto porcentaje de silicio de las láminas tetraédricas es sustituido por aluminio. Las cargas negativas que aparecen se compensan casi todas por iones potasio, que se acomodan entre las unidades cristalinas, proporcionando uniones adicionales entre ellas. Este mecanismo de enlace, que se conoce como “puentes de potasio”, ejerce un efecto estabilizador sobre la red cristalina, y evita que se pueda producir una amplia expansión, tal como ocurría en el caso de la montmorillonita. Sólo algunos de los Al tetraédricos, no están relacionados en la formación de los puentes de potasio, y sirven para adsorber e intercambiar cationes. Por todo ello, la illita presenta menor capacidad de hidratación, dilatación y adsorción catiónica que la montmorillonita, a pesar de tener una estructura muy similar. No obstante, supera en estos aspectos a la caolinita. La capacidad de cambio de cationes suele oscilar entre 15 y 40 meq/100g.

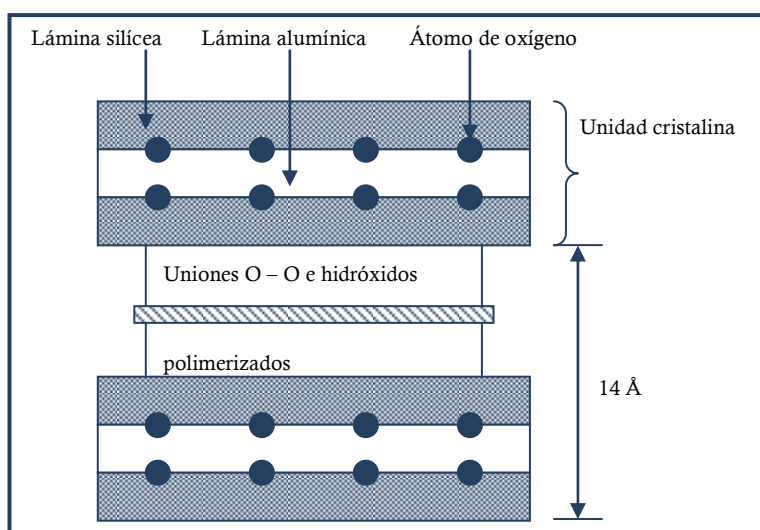


Gráf. I.6. Esquema de la estructura laminar de la illita. Posee una mediana expansión de la red y, por tanto, entrada limitada de agua y cationes.

➤ *Grupo de la clorita.*

La clorita presenta también una estructura tipo red 2:1. Pero en este caso, las unidades cristalinas se mantienen juntas más por los hidróxidos de magnesio y aluminio que por el potasio, como ocurría en la illita.

Las láminas de hidróxidos enlazan a las unidades cristalinas, no permitiendo su expansión cuando el mineral se moja con agua. Esta estructura se denomina a veces tipo de red 2:2 ó 2:1:1, porque contiene dos láminas tetraédricas y una octaédrica como la montmorillonita, más una segunda lámina octaédrica asociada con la capa de hidróxidos (Gráf. I.7).



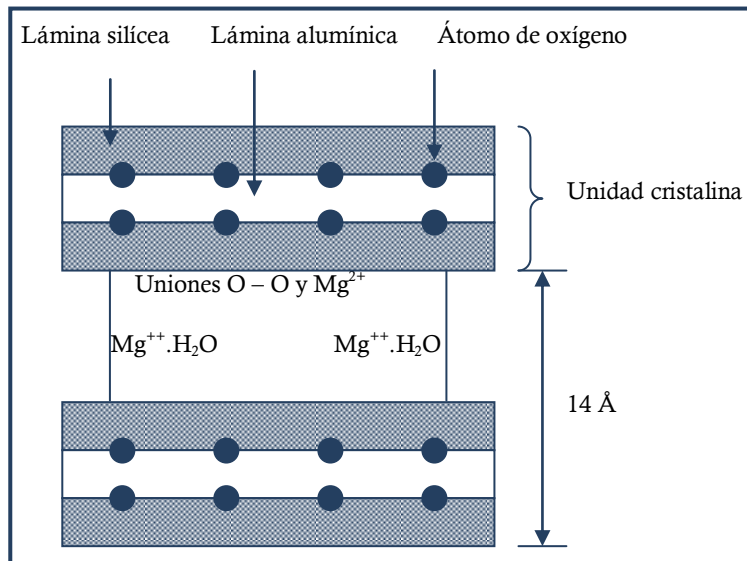
Gráf. I.7. Esquema de la estructura laminar de la clorita. Posee una difícil expansión de la red y, por tanto, dificulta la entrada de agua y cationes.

La clorita presenta una capacidad de cambio catiónica entre 10 y 40 meq/100g.

➤ *Grupo de la vermiculita.*

La vermiculita presenta un retículo cristalino similar a la illita, pero en lugar de contener potasio entre las láminas silíceas adyacentes, contiene magnesio. Su espaciamiento basal es 14Å, y debido a que puede adsorber además agua, se la conoce como “arcilla hinchable” (Gráf. I.8)).

La vermiculita tiene una capacidad de intercambio catiónico elevada (120 – 150 meq/100g).



Gráf. I.8. Esquema de la estructura laminar de la vermiculita. Posee una fácil expansión de la red lo que facilita la entrada de agua y cationes sustituyendo Mg^{++} .

➤ *Grupo de los minerales intermedios.*

Este grupo está constituido por una considerable variedad de formas intermedias de los cinco grupos anteriormente descritos.

I. 4. Degradación hídrica.

A lo largo de la historia, los usos tradicionales del suelo han sido respetuosos con el medio ambiente y se ha mantenido un equilibrio entre el aprovechamiento de los recursos y la conservación de los mismos. Sin embargo, la necesidad de producir alimentos para una población mundial creciente a partir del siglo XX ha conllevado intensificar las prácticas agrícolas, además de aumentar la superficie de suelos dedicados a la agricultura y la mecanización cada vez más potente, todo esto ha generado la degradación de los suelos y por lo tanto la pérdida de la capacidad de los mismos para desarrollar algunas de las funciones señaladas anteriormente.

Los principales tipos de degradación que afectan al suelo, en general, son la erosión, la pérdida de materia orgánica, la salinización, la compactación y el sellado. En los campos agrícolas mediterráneos, en particular, es la erosión el principal agente degradante. Si bien, no es tan claramente manifiesta como en zonas naturales, en las que las incisiones de regueros y cárcavas permanecen visibles una vez que han sido formados, debido a que las prácticas agrícolas los eliminan periódicamente, aunque no sus efectos.

Los Mapas de los Estados Erosivos (MOPT, 1992) aplicando el modelo USLE (Wischmeier y Smith, 1978), para todo el territorio nacional, revelaron la importancia de la degradación del suelo en las áreas agrícolas. El 73% de las pérdidas totales de suelo tiene lugar en campos de agricultura extensiva de cultivos de secano herbáceos, arbóreos y viñedos, y hasta el 11% tiene lugar en terrenos de erial o con matorral y arbolado disperso (de Alba et al., 2003).

La roturación de la tierra para su aprovechamiento agrícola va encaminada a conseguir la mayor captación de agua de lluvia y la menor pérdida de ésta. Tradicionalmente el laboreo tenía como principal objetivo preparar la superficie del suelo para que el agua penetrara en el suelo y evitar o reducir al máximo su evaporación o su consumo por la vegetación espontánea. Al mismo tiempo con el laboreo se preparaba el suelo adecuadamente para asegurarse unas buenas condiciones para la siembra, nascencia de las semillas, la preparación para el riego o bien para incorporar biomasa y otros productos necesarios. Pero el laboreo tradicional conlleva la eliminación de la vegetación natural y la transformación de las propiedades físicas (estructura, agregados, aumento de la compactación) y químicas (disminución del contenido en materia orgánica y nutrientes) del mismo (Martínez, 2005).

Sin vegetación natural y sin materia orgánica (manto protector natural), el suelo se queda expuesto a la acción de las lluvias irregulares características del clima mediterráneo. Así en los episodios de lluvia fuertes, el impacto de las gotas de la lluvia desestructura el suelo y genera el arrastre de partículas del mismo, ocasionando adelgazamiento de los horizontes superficiales, algunas veces hasta la desaparición de los mismos y la consecuente pérdida de nutrientes.

La capacidad de almacenar agua de un suelo depende principalmente de su textura, pero es su estructura la que proporciona el espacio poroso por el que ha de circular esta agua. De la clase de porosidad va a depender en buena medida la conservación del agua y su disponibilidad para las plantas. Cualquier alteración de la estructura del suelo afectará de forma positiva o negativa a la

cantidad de agua y a su conservación. Por ello es de gran importancia que el manejo de los suelos evite, tanto el transporte de sólidos, como la degradación de la estructura (Martínez, 2005).

Por lo tanto, surge un enfrentamiento entre las prácticas tradicionales de laboreo y el aprovechamiento sostenible del suelo. La agricultura de conservación es el concepto que puede dar solución a este problema.

I. 5. Agricultura de conservación.

La agricultura de conservación consiste en diversas prácticas agronómicas que permiten un manejo del suelo agrícola alterando lo menos posible su composición, estructura y biodiversidad, y evitando también su erosión y degradación.

CTIC (Centro de Información Tecnológica de Conservación) (1996) define agricultura de conservación como aquella que se basa en el uso de cubiertas protectoras del suelo a base de residuos del cultivo anterior. El manejo del suelo de conservación se define como cualquier técnica o sistema que mantenga al menos un 30% de cubierta con restos de cosecha sobre la superficie del suelo hasta después de la siembra del siguiente cultivo.

En cultivos extensivos se puede distinguir entre los sistemas con trabajo mecánico del suelo reducido o mínimo y los de laboreo nulo o siembra directa. La eliminación del volteo y reducción del número y profundidad de las labores se ha extendido por los elevados costes del laboreo tradicional y por ser más fácil de aplicar para los agricultores dado que los cambios en las técnicas y equipos necesarios son limitados. Desde un punto de vista conservacionista la siembra directa es la técnica recomendable (Perea y Gil, 2006).

En términos generales, con las técnicas de conservación, el suelo queda protegido de la erosión y escorrentía, se aumentan la formación natural de los agregados del suelo, la materia orgánica y la fertilidad, y a su vez se disminuye la compactación debido al tránsito de la maquinaria agrícola. Además, tiene lugar una menor contaminación de las aguas superficiales, se reducen las emisiones de CO₂ a la atmósfera y se aumenta la biodiversidad (AEAC.SV, en línea).

Las técnicas de conservación pueden reducir los costes, pero ello sólo se consigue con una aplicación eficiente de estos sistemas: controlando las malas hierbas, manejando adecuadamente los residuos, empleando las sembradoras, equipos de tracción y neumáticos adecuados y limitando los insumos de los cultivos a través de una distribución y aprovechamiento eficiente de los agroquímicos, la tendencia es a la localización de productos reduciendo las pérdidas y la contaminación (Perea y Gil, 2006).

En términos particulares, y desarrollando algunas de las ventajas de la agricultura de conservación citadas anteriormente se obtienen referencias de estudios científicos que dan testimonio de ello.

El manejo es uno de los factores determinantes en la erosión del suelo debido al control que ejerce sobre la cubierta vegetal y la estructura del suelo. Parte del agua de lluvia no se infiltra y se pierde por escorrentía, arrastrando con ella sedimentos, lo que provoca erosión superficial del suelo. Tras cuantificar la escorrentía en parcelas bajo diferentes manejos agrícolas, Cerdà (2005) obtiene que las pérdidas más bajas son las sufridas en parcelas con agricultura de conservación. Cuando el estudio se centra no sólo en la escorrentía sino también en el arrastre de sedimentos por parte de esa agua, Cerdà y Lasanta (2005) y Espejo-Pérez et al. (2005) obtienen una mayor tasa de erosión en suelos de barbecho, por un lado, y con laboreo convencional, por el otro, frente a los suelos con técnicas agrícolas de conservación. Incluso en suelos que ya han sufrido los efectos más graves de la erosión hídrica, esto es, la formación de regueros y cárcavas, actuar sobre ellos con prácticas conservacionistas mejora la situación según expone Contreras en el Congreso Internacional de Agricultura de Conservación (Córdoba, 2005).

Los resultados de estudios del balance de agua en suelos arcillosos bajo laboreo convencional y siembra directa evidencian una mayor disponibilidad de agua en el perfil en los sistemas de agricultura de conservación, sobre todo durante los periodos de máxima demanda hídrica. También se observan en estos sistemas mayores tasas de evapotranspiración, compensando en estos sistemas más del 50 % de la demanda hídrica exigida (Jiménez et al., 2005 y Muriel et al. 2005)

En cuanto a la estabilidad de los agregados se ha constatado un general incremento en suelos bajo agricultura de conservación, el cual está relacionado con la incorporación de estiércol además de aumento de la cubierta vegetal y de restos de poda y acolchado que han favorecido un aumento de la materia orgánica. Los suelos con laboreo tradicional tienen menor aumento de estabilidad de agregados y los que tienen aplicación de herbicidas no muestran cambios apreciables (Cerdà, 1996).

El aumento de la biodiversidad es una consecuencia directa de los sistemas de laboreo de conservación que favorecen el desarrollo de las poblaciones de lombrices de tierra, ya que aumentan la disponibilidad de alimento con los restos del cultivo dejados sobre el suelo, y reducen la alteración mecánica de los horizontes superiores, lo que permite conservar su sistema de galerías. Los resultados obtenidos en diversos estudios (Bescansa et al., 2005 y Haines y Uren, 1990) muestran diferencias significativas entre no laboreo, laboreo mínimo y laboreo convencional, tanto en diversidad como en número de individuos y biomasa total, existiendo un incremento considerable de la población total y de la biomasa en los sistemas de siembra directa frente a los de mínimo laboreo y laboreo convencional. Estas diferencias son mucho más acusadas en otoño tras las labores de preparación del suelo. El laboreo afecta profundamente el desarrollo de individuos, encontrándose lombrices sólo en los tratamientos de no laboreo.

El efecto del laboreo sobre la calidad del suelo se refleja fundamentalmente en el cambio de su estructura debido a diferentes factores como, el contenido de materia orgánica, que aumenta al disminuir el laboreo, la retención de agua del suelo, que se incrementa por la presencia de una cubierta vegetal que retarda su evaporación y el desarrollo de diversas comunidades de fauna, en

particular las lombrices, que son beneficiosas para la calidad del suelo (Soil and Water Conservation Service, 1995).

Por consiguiente los sistemas de laboreo de conservación influyen en la evolución de las propiedades de los suelos. La reducción del laboreo del suelo puede influir y modificar los ciclos de nutrientes, mejorar la calidad de los suelos y aumentar la productividad de los cultivos (Bending et al., 2000).

En relación al ahorro económico que supone la agricultura de conservación, las técnicas de Agricultura de Precisión: ayuda al guiado y guiado automático permiten trabajar más eficientemente, reduciendo los solapes entre pasadas lo que supone ahorros del 10 – 20% en los tiempos de trabajo, en el consumo de gasoil y en la distribución de insumos. Combinadas con las tecnologías de distribución variable, que adaptan las dosis a la productividad específica de cada punto de la parcela, se aumenta aún más la eficiencia de los insumos (Perea y Gil, 2006).

La energía total usada por hectárea es menor debido, principalmente, al descenso en el uso de energía asociada a la maquinaria y combustible. Aunque la energía asociada a la aplicación de los herbicidas pueda incrementarse, las dosis de siembra y de abonado suelen ser similares. Además, se producen menos emisiones contaminantes y se aumenta la concentración de materia orgánica y de carbono orgánico (Unger, 2000).

En la Finca Experimental Tomejil, lugar donde se localiza este estudio, desde 1982 se han aplicado sistemas diferenciales de manejo del suelo, en una rotación normal de la zona de trigo-girasol-leguminosa.

Los tratamientos del suelo se describen a continuación:

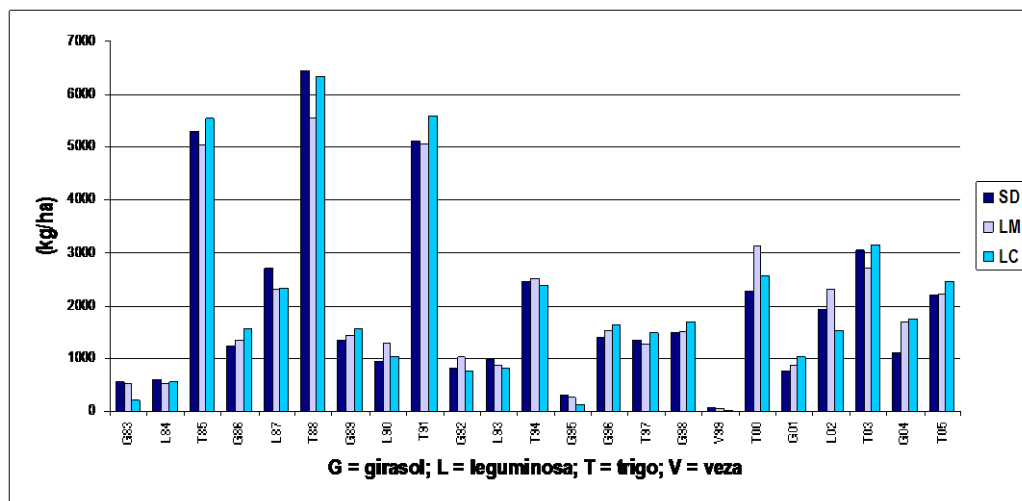
- Laboreo convencional: en el cual las labores realizadas tratan de imitar las efectuadas de forma tradicional por los agricultores de la zona, es decir, quema de rastrojos y alzado con aperos de tipo vertedera que invierten los horizontes del suelo a una profundidad de 40 - 50 cm, aproximadamente, y a continuación, con sucesivos pases de cultivador o grada, se reduce el tamaño de los macroagregados de labor, de tal modo que pueda actuar la sembradora sin dificultad. Durante el ciclo del cultivo se suelen dar pases de labor, si se trata de una planta de escarda, para el control de malas hierbas.
- Laboreo mínimo: donde se labra de forma superficial y se reduce la escarda mecánica con aplicación de herbicidas de bajo impacto ambiental.
- Siembra directa: en la que el suelo no recibe labor alguna desde la recolección del cultivo hasta la siembra del siguiente, dejando el suelo protegido la mayor parte del año por una cubierta vegetal procedente de los residuos de la cosecha del año anterior. Al igual que en el caso anterior, el control de adventicias se realiza mediante aplicación de herbicidas totales, de bajo impacto ambiental, y lógicamente el uso de la

maquinaria estará relegado a la aplicación de estos fitosanitarios, la siembra, que se debe realizar con maquinaria especializada para estos sistemas, y la recolección (Perea, 2006).

Los datos de producción (kg/ha) obtenidos en el ensayo de larga duración (con datos desde 1982 hasta 2005) en las tres parcelas de trabajo de la Finca concluyen que no existe dependencia significativa de la producción con respecto al sistema de manejo del suelo. Como se aprecia tanto en la tabla I.4 como en la grafica I.9 la producción es similar en las tres parcelas para cada temporada, el aumento o disminución producidos en unos años respecto a otros se debe a las condiciones climáticas fundamentalmente, factor que influye de igual manera independientemente del sistema de manejo del suelo empleado.

CULTIVO Y AÑO	SD	LM	LC
G83	561	524	225
L84	611	536	565
T85	5315	5047	5537
G86	1249	1350	1558
L87	2712	2300	2333
T88	6444	5543	6329
G89	1365	1426	1560
L90	957	1307	1041
T91	5106	5077	5594
G92	829	1046	763
L93	987	868	823
T94	2464	2528	2377
G95	320	273	122
G96	1417	1526	1639
T97	1362	1274	1491
G98	1491	1519	1690
V99	77	53	35
T00	2286	3120	2573
G01	778	870	1031
L02	1938	2310	1535
T03	3049	2712	3151
G04	1107	1708	1756
T05	2192	2216	2469

Tabla I.4. Producción en kg/ha para siembra directa, mínimo laboreo y laboreo convencional desde 1982 hasta 2005. T=trigo, G=girasol y L=leguminosa.



Gráf. I.9. Producción en kg/ha para siembra directa, mínimo laboreo y laboreo convencional desde 1982 hasta 2005.

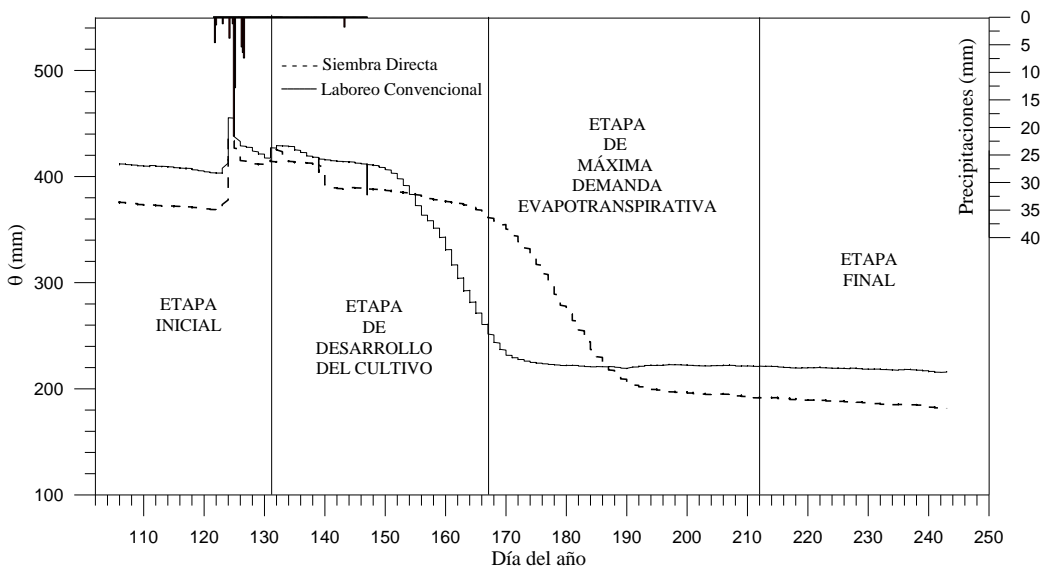
Además de la comparativa de producción, Perea (2006) estudia el contenido de humedad del suelo mediante la instalación *in situ* de sondas FDR (Frequency Domain Reflectometry) (Imagen I.7), que albergan los sensores de capacitancia semiautomáticos que permiten efectuar un registro de la humedad del suelo en tiempo real, a profundidades específicas y con la ventaja añadida de que disturbam al mínimo las condiciones naturales del suelo. Su uso ha aportado nuevas ventajas al estudio de las propiedades hidrológicas del suelo.



Imagen I.7. Sonda FDR

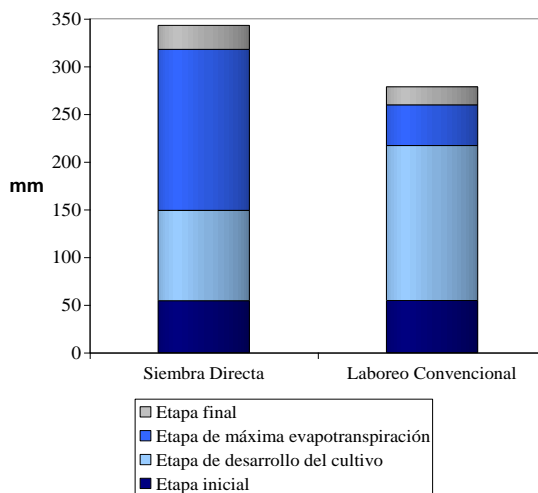
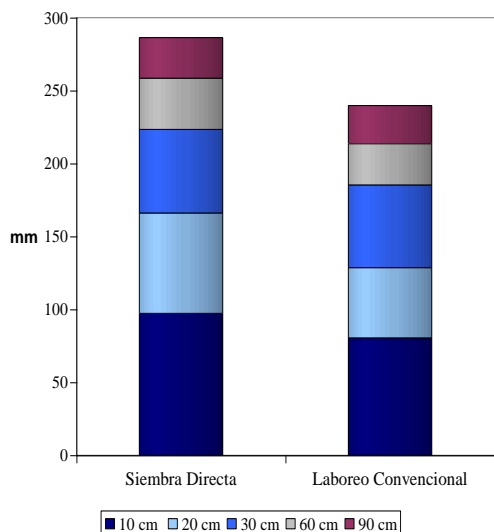
Gracias a estas sondas se han determinado los contenidos de humedad del suelo a 90 cm en los tratamientos de siembra directa y laboreo convencional (Graf. I.10). Se indican tres fases bien definidas:

- Periodo húmedo, que corresponde a la fase inicial y parte de la fase de desarrollo del cultivo, en la cual no se presentan diferencias importantes en los contenidos de humedad del suelo entre ambos tratamientos, laboreo convencional y siembra directa.
- Periodo de descarga, que transcurre a partir de finales de mayo, en el que, la coincidencia de altas temperaturas y escasas precipitaciones, provocan un descenso importante de los contenidos de humedad del suelo, más pronunciado en la parcela de laboreo convencional donde se alcanzan valores de 235 mm el día 168, frente a 360 mm de la siembra directa. Este periodo coincide con la máxima demanda de evapotranspiración, en el cual el suelo está prácticamente agotado en la parcela de laboreo convencional, 125 mm menos que en siembra directa.
- Periodo seco, que coincide con la etapa final del cultivo donde los contenidos de humedad son similares en ambos tratamientos.



Gráf. I.10. Humedad del suelo en siembra directa y laboreo convencional a 90 cm de profundidad a lo largo del año agrícola.

Igualmente, la distribución espacial del volumen de agua aportada por el suelo, está influenciada por el sistema de manejo. La figura I.11 indica como, efectivamente, los suelos bajo siembra directa, aportan al cultivo mayor cantidad de agua. Así, es especialmente interesante señalar el comportamiento del suelo en los primeros 20 cm del perfil, zona de influencia radical, donde la siembra directa aporta 150 mm, frente a 116 registrados en laboreo convencional (Jiménez, 2005).

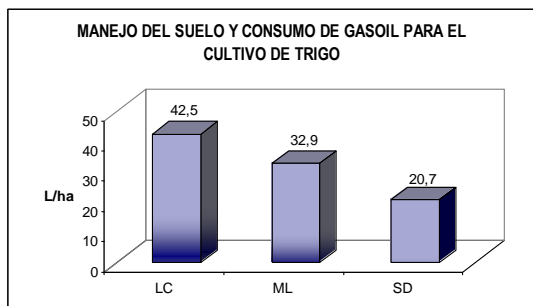


Gráf. I.11. Aporte de agua al cultivo a diferentes profundidades en siembra directa y laboreo convencional.

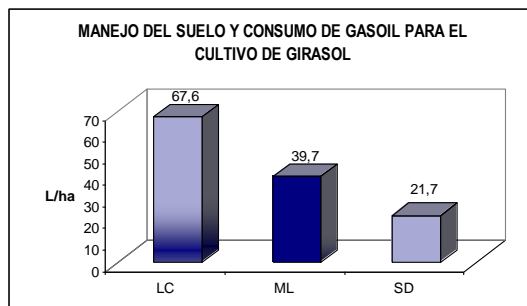
Gráf. I.12.

Si se considera la extracción de agua en las distintas fases del cultivo (Gráf. I.12), se observa un consumo similar por evapotranspiración en ambos tratamientos, aproximadamente 50 mm., durante la fase inicial. La máxima extracción en el laboreo convencional se produce durante la etapa de desarrollo del cultivo, mientras que en siembra directa, la máxima extracción se desplaza al siguiente periodo de máxima evapotranspiración. Señalar también que la siembra directa compensa en un 48% (341 mm) la demanda hídrica total del cultivo frente a 39% del laboreo convencional.

Además de las ventajas que ofrece el sistema de siembra directa, frente al laboreo convencional, en cuanto a reserva de agua para la planta, también presenta ventajas económicas para el agricultor, ya que permite un ahorro en combustible que oscila entre el 51% en el caso del trigo (Gráf. I.13) y del 68% si lo que se cultiva es girasol (Gráf. I.14) (Perea y Gil, 2006).

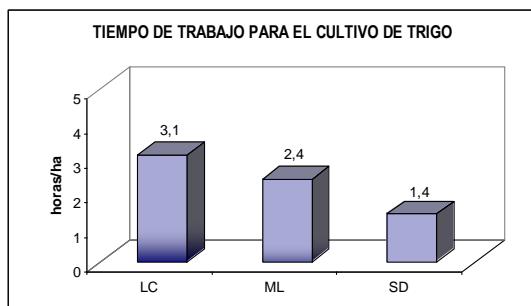


Gráf. I.13. Manejo del suelo y consumo de gasoil para el cultivo de trigo.

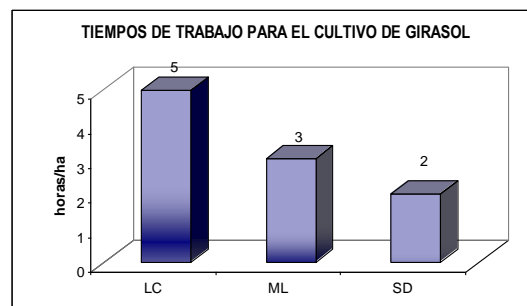


Gráf. I.14. Manejo del suelo y consumo de gasoil para el cultivo de girasol.

El ahorro que supone el sistema de siembra directa llega también al considerar las horas de trabajo necesarias para la producción tanto de trigo como de girasol considerando las tres técnicas de cultivo. Las gráficas I.15 y I.16 representan los tiempos de trabajo empleados por cultivo y manejo de suelo. Se observa, para el cultivo de trigo (Gráf. I.15), una reducción de 1,7 horas ha⁻¹ de las prácticas de siembra directa con respecto a la siembra tradicional; esto supone un 54,8% de reducción en los tiempos de trabajo. Con respecto al cultivo de girasol (Gráf. I.16), la reducción alcanza un 60% de las horas consumidas en la siembra tradicional.



Gráf. I.15. Tiempo de trabajo para el cultivo de trigo.



Gráf. I.16. Tiempo de trabajo para el cultivo de girasol.

I. 6. Zona no saturada.

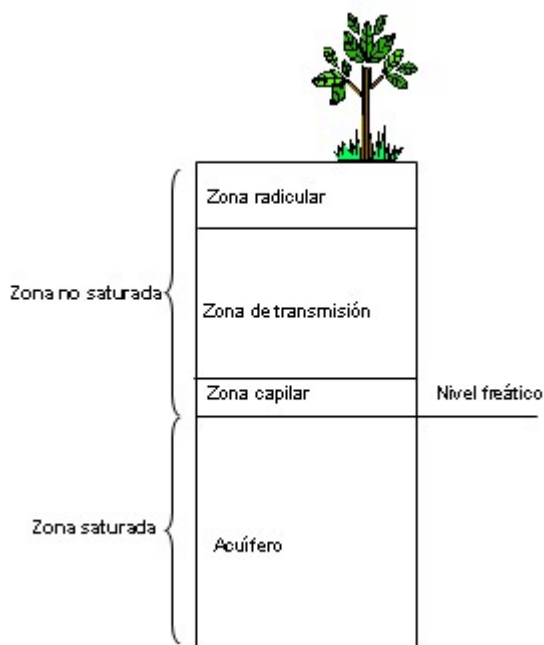
Las técnicas de producción en los sistemas agrarios extensivos exigen, cada vez con mayor rigor, el conocimiento de la relación suelo-agua-planta. El agua es uno de los recursos críticos que más limitan la producción de los cultivos, sobre todo en las zonas semiáridas. Considerando la complejidad de dicho trinomio, el agua no puede ser manejada independientemente del ambiente, de las características del suelo, hidrología del campo, características del cultivo, rotaciones, manejo de residuos y otros factores.

En la mayor parte de España, y, en general, en ambientes de clima mediterráneo, la distribución estacional de las lluvias es irregular, lo que impide el mantenimiento de un balance hídrico adecuado para la producción. Los veranos son secos, la evapotranspiración es intensa, y la variabilidad interanual de las precipitaciones es muy alta. El éxito de los secanos sustentados en este tipo de ambiente depende en gran medida de la capacidad del suelo para almacenar agua y transmitirla al cultivo.

Pretender obtener una relación sencilla entre humedad y rendimiento, puede resultar demasiado simplista, sin embargo, la experiencia demuestra que, cuando no hay una acción negativa de otros factores de la producción vegetal, los rendimientos aumentan de forma lineal a medida que aumenta el régimen de humedad del suelo (Perea, 2006).

La zona no saturada del suelo (ZNS), situada entre la superficie del suelo y los acuíferos, es la gran desconocida, incluso hoy, en el campo de la hidrología y las ciencias ambientales. La ZNS

sirve como base para la vida terrestre, no sólo como su soporte físico, sino por servir de medio para el crecimiento vegetal y microbiano. Esta zona es, desgraciadamente, almacén de sustancias potencialmente contaminantes. En ella, tienen lugar importantes procesos físicos, químicos y biológicos no completamente entendidos. A medida que nuestros recursos hídricos escasean y la conciencia medioambiental de la sociedad aumenta, ésta zona adquiere gran importancia desde un punto de vista no sólo científico sino también práctico (Zona No Saturada, en línea).



El agua del suelo circula a través del espacio poroso, queda retenida en los huecos del suelo y está en constante competencia con la fase gaseosa. Los cambios climáticos estacionales, y concretamente las precipitaciones atmosféricas, hacen variar los porcentajes de cada fase en cada momento.

La fase líquida del suelo está constituida por el agua y las soluciones del suelo. La solución del suelo procede de la alteración de los minerales y de la materia orgánica. La composición de la solución del suelo es de vital importancia para el desarrollo de las plantas ya que las raíces de las mismas toman los nutrientes que se encuentran aquí disueltos.

Por lo tanto, cualquier práctica o actividad que suponga una alteración de la cantidad y/o calidad de la solución del suelo, está condicionando el éxito de la cosecha.

I. 7. Absorción de los elementos nutritivos por las plantas.

Las plantas adquieren los nutrientes esenciales para su desarrollo a través de las hojas y de las raíces. El dióxido de carbono es absorbido a través de los estomas, y es la principal fuente suministradora de carbono y oxígeno. El agua y los restantes elementos químicos generalmente se incorporan a la planta a través de las raíces desde la solución del suelo.

La transferencia de los nutrientes desde el suelo hacia la planta es producida a través de una secuencia de varios procesos. La absorción de agua provee el transporte de nutrientes a través del flujo de masas desde el suelo hacia las raíces. La absorción de nutrientes tiende a vaciar la solución del suelo cerca de las raíces, creando un gradiente de concentración desde el suelo hacia la raíz y disturbando el equilibrio entre los iones disueltos en la solución del suelo y aquellos adsorbidos en la fase sólida del suelo. Estos procesos causan tanto el transporte del nutriente desde el suelo a la raíz como la desorción desde el material sólido del suelo que repone la concentración en la solución del suelo. Cuando las raíces absorben un nutriente su concentración puede cambiar drásticamente en la superficie de la raíz. Si el flujo de masas es mayor que la absorción, los nutrientes se acumulan e incluso pueden precipitar alrededor de las raíces. Esto ha sido mostrado en la formación de sales de calcio. Por contraste, los nutrientes de concentración relativamente baja en la solución del suelo, tales como fosfato y potasio, decrecen rápidamente en la interfase suelo-raíz. La cantidad de un nutriente que puede ser adquirido está determinado por el grado de depresión a la superficie de la raíz, la extensión de la zona deprimida alrededor de las raíces individuales, y la distancia media entre las raíces (Jungk, 2001).

Según Navarro (2000) existe un amplio número de factores que influyen en la absorción de los nutrientes por la planta y, en consecuencia, en su composición posterior. Todos ellos están íntimamente relacionados entre sí aunque pueden clasificarse en tres grupos, según su relación con el suelo, con la planta o con las condiciones climáticas.

➤ *Relacionados con el suelo.*

- Textura. Los suelos de textura fina, debido a la gran superficie de sus partículas, ofrecen mayores posibilidades de contacto con los pelos absorbentes que los de textura gruesa.
- Porcentaje de oxígeno en el aire del suelo. La absorción mineral se inhibe por la ausencia de oxígeno en el aire del suelo.
- pH del suelo. El pH afecta generalmente a la absorción por su influencia en el estado de asimilación del nutriente, o en la cantidad del mismo disponible.
- Interacciones iónicas. Los nutrientes en estado iónico pueden ejercer interacciones entre ellos que originen un aumento o disminución de su absorción por parte de la planta.

- *Relacionados con la planta.*
 - Naturaleza de la planta. Las plantas difieren unas de otras en su poder de absorción.
 - Fase de desarrollo. Las plantas jóvenes absorben rápida e intensamente los elementos minerales.
- *Relacionados con las condiciones climáticas.*
 - Temperatura. En general, dentro de los límites fisiológicos (0-40 °C), un aumento de la temperatura provoca una mayor absorción de iones.
 - Humedad. La absorción mineral se incrementa al aumentar, dentro de unos límites, la humedad del suelo, ya que la humedad favorece la actividad de la planta.
 - Luz. La luz no tiene sobre la nutrición mineral más que un efecto indirecto. Un aumento de la iluminación produce un incremento de las reservas carbonadas y de la transpiración. Por consiguiente, tiende a favorecer.

I. 8. Elementos esenciales.

Arnon y Stout en 1939 establecieron, utilizando cultivos hidropónicos, los criterios que debe cumplir un elemento para considerarse esencial para los vegetales:

- a. Su carencia hace imposible que se completen las fases vegetativas o reproductoras que componen el ciclo vital de la planta;
- b. La deficiencia es específica y no puede ser prevenida o corregida más que con el aporte de este elemento, y
- c. El elemento está directamente relacionado con la nutrición de la planta, independientemente de que pueda presentar otros posibles efectos en la corrección de alguna condición química o microbiana desfavorable del suelo o de los medios de cultivo.

Los elementos que actualmente se consideran esenciales para las plantas superiores son:

1. Macronutrientes: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre.
2. Micronutrientes: hierro, manganeso, cobre, cinc, boro, molibdeno y cloro.

Otros elementos que no se consideran esenciales pero que aparecen con cierta frecuencia y que se ha comprobado que en muchos casos resultan útiles son: cobalto, sodio y silicio.

Las plantas obtienen el carbono, el hidrógeno y el oxígeno del aire atmosférico y del agua. Estos elementos llegan a representar del 90 al 95% del peso seco de la planta.

Con criterios agronómicos, los macronutrientes esenciales que las plantas necesitan absorber del suelo se dividen en dos grupos (Mengel et al., 1982):

- a) nitrógeno, fósforo y potasio, que son absorbidos por la planta, según los casos, en cantidades moderadas o importantes, sus carencias son frecuentes y constituyen los componentes principales de los fertilizantes comerciales,
- b) calcio, magnesio y azufre, absorbidos por las plantas en cantidades moderadas y, aunque sus carencias suelen ser menos frecuentes, pueden adquirir cierta importancia en condiciones locales o regionales.

El sodio no es un elemento esencial para las plantas cultivadas, aunque es beneficioso para algunos cultivos, como la remolacha azucarera, e incluso se afirma como esencial para *Atriplex vesicaria* y otras especies halofitas (Brownell y Wood, 1957).

I.9. Potasio.

El potasio es uno de los tres o cuatro elementos que con más frecuencia se encuentran en el suelo en cantidad insuficiente y, en consecuencia, limitan las cosechas.

El K cumple un papel importante en la activación de un gran número de enzimas que actúan en diversos procesos metabólicos tales como fotosíntesis, síntesis de proteínas e hidratos de carbono; también tiene incidencia en el balance de agua y en el crecimiento meristemático (Mengel y Kirby, 1987). Al participar de estos procesos metabólicos, el K actúa favoreciendo el crecimiento vegetativo, la fructificación, la maduración y la calidad de los frutos.

El potasio puede estar en la solución del suelo, adsorbido en la superficie de las arcillas, fijado en la capa de arcilla y en los minerales primarios del suelo, haciendo parte del enrejado cristalino. Todas estas formas se encuentran en equilibrio en el suelo, a través de los procesos de adsorción-desorción, fijación, inmovilización, meteorización, originando cambios de una forma a otra (Hoa, 2003).

El contenido de potasio total en el suelo varía ampliamente, desde menos del 0,01% hasta cerca del 4%, pero se sitúa, normalmente, alrededor del 1%. Los dos grupos de minerales potásicos que se presentan en las rocas y en el suelo en mayores proporciones son las micas: moscovita $[KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2]$ y biotita $[K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2]$; y los feldespatos potásicos: (ortoclasas, $KAlSi_3O_8$). Estos minerales son muy frecuentes en las rocas ricas en sílice y aluminio como el granito, pero también aparecen, aunque en menores proporciones, en las rocas ricas en magnesio y en hierro. La riqueza potásica de las rocas sedimentarias varía con su contenido de arcillas y, particularmente, de ilita. Las areniscas presentan, normalmente, bajo o muy bajo contenido de potasio; las arcillas y esquistos pueden contener del 2 al 4% de potasio, y en las rocas calcáreas el contenido de potasio varía con su proporción de arcillas (Wild, 1992).

La fracción arcillosa es la que presenta un contenido mayor de potasio, por lo que los suelos arcillosos y limo-arcillosos son más ricos que los limo-arenosos y arenosos. Hay que significar, no obstante, que esta variación en el contenido de potasio está también influenciada por la intensidad de las pérdidas: extracción por cultivos, lixiviación y erosión. En los suelos cultivados dependerá de los aportes que se realicen, principalmente bajo la forma de fertilizantes (Navarro, 2000).

Según Conti (2000), en función de su aprovechamiento por las plantas, el potasio del suelo puede ser clasificado en tres categorías:

- i. *Potasio no asimilable.* Supone la mayor parte del potasio total del suelo (entre el 90 y 98%). En este caso se encuentra por lo general formando parte de las estructuras y redes cristalinas de minerales primarios, como los feldspatos y las micas. También en minerales secundarios que fijan potasio en su estructura, como la ilita. Ambas constituyen el K de reserva o de reposición de los suelos. Se produce un equilibrio entre el K intercambiable y estas formas no-intercambiables. El proceso para alcanzar el estado de equilibrio es mucho más lento que el de K de la solución del suelo-K intercambiable
- ii. *Potasio lentamente asimilable.* Es la forma iónica del potasio (K^+) unido electrostáticamente a los materiales que componen la fase sólida coloidal mineral y orgánica. A medida que la concentración del K de la solución desciende, el K adsorbido es liberado a la solución del suelo. A la inversa, si la concentración de K de la solución del suelo aumenta por la aplicación de fertilizantes potásicos, parte de éste dejará la solución y se unirá electrostáticamente al material coloidal de la fase sólida.
- iii. *Potasio rápidamente asimilable.* Entre el 1 y 2% del potasio total es asimilable. En esta situación se encuentra en la disolución del suelo o como intercambiable adsorbido a los coloides. El K de la solución de suelo está inmediatamente disponible y puede ser absorbido por las plantas en forma inmediata. Las plantas en crecimiento rápidamente extraen el K de la solución del suelo, pero a medida que el K es absorbido y extraído, su concentración es renovada y restituida inmediatamente por la cesión de formas menos fácilmente accesibles ubicadas en las zonas de adsorción de los coloides minerales y orgánicos del suelo. El proceso de adsorción-desorción es el que repone y equilibra la concentración de K de la solución del suelo.

I. 10. Sodio.

Durante gran parte del siglo XIX, el sodio fue considerado como un elemento esencial para la vida vegetal. Pero ya en 1860 esta creencia fue desechada, aceptándose sólo como un simple estimulante o parcial sustituto del potasio (Navarro, 2000). En el momento actual, la mayoría de los autores sólo lo aceptan en estos casos, y consideran que no puede generalizarse a todas las plantas.

El sodio es absorbido por la planta como Na^+ . Su contenido puede variar ampliamente, dependiendo del existente en el suelo, de la especie que se considere y del órgano que se analice. Como valor medio se acepta 1200 ppm en peso seco, siendo las hojas, normalmente, más ricas que las semillas, y las leguminosas que los pastos.

La función específica que el sodio puede desempeñar en la planta no se conoce. Algunos investigadores han señalado recientemente su posible acción como activador de la enzima carboxilasa fosfoenolpirúvica, primera enzima de carboxilación en la fotosíntesis de plantas C_4 . Se han observado otros efectos favorables del sodio: durante los períodos de sequedad retrasa el marchitamiento de la planta, manteniendo el potencial osmótico celular; en invierno y principio de primavera puede disminuir los posibles daños por heladas, ya que su presencia hace descender el punto de congelación de la savia; proporciona mayor color y aroma a las hortalizas, como es el caso de la col; e incluso en pastos dedicados a la alimentación de ganado, parece que las aplicaciones de sodio mejoran la producción animal (Navarro, 2000).

En el suelo, el sodio procede de los minerales silicatados, como hornblenda y moscovita. Los más ricos son los que durante mucho tiempo se han encontrado inundados por el agua del mar (marismas, por ejemplo), suelos abonados regularmente con fertilizantes sódicos, y aquellos originados bajo climas áridos. El sodio es muy lixiviable, y es llevado al mar por el agua de los ríos. De allí puede retornar al suelo, principalmente de las zonas costeras, por acción del viento. Desaparece fácilmente de los suelos si sobrevienen lluvias abundantes, o si se dispone de una cantidad de agua de riego, siempre que el nivel freático sea bajo. Indudablemente, una parte del sodio queda adsorbido, pero el poder de retención es bajo, y ello hace que sea eliminado por las aguas de lavado en una gran extensión (Navarro, 2000).

En las regiones áridas (zonas en donde la lluvia es menor de 500 mm/año), algunos suelos se desarrollan bajo condiciones de drenaje pobres, y se evapora más agua que la que capta por la lluvia. En estas condiciones, las sales solubles y el sodio adsorbido pueden acumularse en cantidades elevadas en el horizonte superficial, e impedir el crecimiento de las plantas. Estos suelos son designados como halomórficos, y han sido clasificados en tres clases: salinos, salino-sódicos y sódicos (Navarro, 2000).

I.11. Calcio.

El calcio es absorbido por la planta fundamentalmente bajo la forma de Ca^+ y es, después del potasio, el elemento básico más abundante que existe en las plantas. En proporciones mucho menores, también es absorbido mediante un intercambio directo entre los pelos radiculares y el complejo coloidal al que se encuentra adsorbido.

El calcio es fundamental para el crecimiento de los meristemos y, especialmente, para el adecuado crecimiento y funcionamiento de los ápices radiculares. Juega un papel clave en el mantenimiento de la integridad de las membranas protegiéndolas de resquebrajaduras. Protege, asimismo, los sistemas radiculares frente a: los desequilibrios iónicos, bajos niveles de pH y toxicidad

de algunos elementos, como el aluminio. Es necesario para la formación de algunas enzimas, como la simlilasa y determinadas nucleasas. Es el catión más importante entre los que se encuentran en la laminilla media de las paredes celulares y está presente, formando parte de la fitina, en las semillas. Se ha comprobado que el calcio juega un papel fundamental en la fisiología celular de los vegetales moderando la actividad enzimática (Hanson, 1984; Marmé, 1983).

En casi todos los suelos neutros o sólo ligeramente ácidos, los iones Ca^{2+} ocupan la mayor parte de las posiciones de cambio de las arcillas y de los coloides húmicos. Además, el calcio puede presentarse como calcita (CaCO_3) en los suelos formados a partir de rocas calizas y otros materiales calcáreos, y en los suelos recientemente encalados. Aparece en forma de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en algunos suelos de las regiones áridas y semiáridas. En las regiones húmedas, el Ca es lixiviado y a medida que el suelo se acidifica, su lugar como catión de cambio sobre el complejo puede ir ocupándose por el Al. En condiciones de acidez, la relación de Ca cambiante a Mg cambiante se reduce y puede llegar a ser menor que 1 debido, probablemente, a la baja liberación del Mg de los silicatos (Wild, 1992).

En los suelos ácidos, normalmente situados en zonas sometidas a una alta pluviometría, el movimiento de este elemento es más amplio, originándose el lavado del mismo.

La adición de cal al suelo con el fin de reducir su acidez es una práctica comúnmente empleada desde hace muchos años. Se debe considerar, por tanto, como una enmienda, aunque ello lleve consigo un aporte simultáneo de calcio y también en la mayoría de los casos de magnesio. Hay que significar que la adición de cal a los suelos no es sólo importante porque permite establecer un pH más apropiado para la mayoría de los cultivos, sino también por los efectos beneficiosos que indirectamente éstos reciben en lo que respecta a la absorción y asimilación de diversos elementos esenciales. En este sentido, los efectos sobre la disponibilidad del nitrógeno, fósforo, potasio y de ciertos oligoelementos son dignos de ser señalados (Navarro, 2000).

I.12. Magnesio.

El magnesio es absorbido por la planta como Mg^{2+} , y en ella se halla normalmente un contenido total medio del orden de 0,5% en peso seco.

En la planta, el magnesio es un constituyente metálico de excepción en la molécula de clorofila, pigmento esencial para que las plantas verdes puedan llevar a cabo el proceso de fotosíntesis. Pero el magnesio no sólo está presente en las partes verdes de la planta, sino que además se encuentra en proporciones notables en plantas sin clorofila, como hongos, por ejemplo. Hay que señalar que, a diferencia del calcio, el magnesio es muy móvil en el floema (un 70% se considera como difusible), y puede trasladarse fácilmente de las hojas viejas a las jóvenes en caso de deficiencia. Por ello, cuando ésta se presenta, los primeros síntomas aparecen en primer lugar en las hojas adultas (Navarro, 2000).

En los suelos el magnesio se encuentra como constituyente de numerosos minerales, mayoritariamente silicatos, entre ellos, y como más frecuentes, merecen señalarse: biotita ($\text{Si}_3\text{O}_{10}\text{AlK}(\text{MgFe})_3(\text{OH})_2$), serpentina ($\text{SiO}_9\text{Mg}_3\text{H}_4$) y olivino (SiO_4FeMg). También se encuentra formando parte de otros silicatos como clorita, vermiculita, ilita y montmorillonita. Algunos suelos contienen magnesio como magnesita (CO_3Mg) y dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). En los suelos de regiones áridas o semiáridas pueden encontrarse notables cantidades bajo la forma sulfato (SO_4Mg). En la descomposición de estos minerales, y también en la degradación de la materia orgánica que se incorpora al suelo como residuos diversos de animales y vegetales, el magnesio pasa en parte al estado de sales solubles: cloruros, sulfatos, etc.; y en este estado puede tener distintos destinos: perderse por lixiviación, absorbido por los organismos del suelo, adsorbido o fijado por los coloides, o precipitado como compuestos magnésicos secundarios, principalmente en regiones áridas (Navarro, 2000).

Teniendo en cuenta, por tanto, el origen en los suelos del magnesio, se deduce fácilmente que la mayor parte del mismo se encuentra bajo formas inutilizables por la planta. En consecuencia, y bajo el punto de vista de su aprovechamiento por la planta, el magnesio presenta una notable similitud con el potasio, ya que se encuentra distribuido en el suelo como magnesio lentamente asimilable, asimilable y rápidamente asimilable. Estando estas tres formas en equilibrio dinámico (Navarro, 2000).

I.13. Azufre.

El azufre es absorbido por la planta casi exclusivamente en forma de SO_4^{2-} , a través de su sistema radicular. En pequeñas cantidades también puede ser absorbido del suelo como SO_3^{2-} y de la atmósfera como dióxido de azufre, por las hojas, a través de los estomas.

La mayor parte del SO_4^{2-} absorbido se reduce en la planta a compuestos sulfhídricos (-SH), y así, en este estado, se integra en los compuestos orgánicos. Sólo una pequeña parte se incorpora sin ningún cambio redox, y como tal ión inorgánico contribuye a la regulación osmótica celular. Una vez reducido en la planta puede ser oxidado a SO_4^{2-} y permanecer en la planta como reserva. Bajo esta forma se halla distribuido con bastante regularidad en todas las partes vitales: raíces, tallos, hojas, etc. El SO_4^{2-} es poco móvil por lo que está disponible en los órganos de crecimiento más tardíamente. Esto explica porqué una deficiencia de azufre se manifiesta primeramente en las hojas jóvenes (Navarro, 2000).

Son muchos e importantes los procesos bioquímicos en los que participan los compuestos orgánicos con azufre. Esta participación, ya puesta de manifiesto en la biosíntesis de lípidos, clorofilas, carotenos y ácidos orgánicos puede complementarse incluyendo dos procesos también esenciales en el metabolismo vegetal: la biosíntesis de los aminoácidos sulfurados cisterna, cistina y metionina, y la formación del acetilcoenzima A, eslabón básico de conexión entre la glucólisis y el ciclo de Krebs (Navarro, 2000).

El valor nutritivo de los cereales se reduce en plantas con carencia de S, debido a su menor síntesis de cisterna, metionina y otros aminoácidos esenciales. Los granos de trigo con carencia de S

proporcionan una masa dura con pequeña elasticidad, que originan baja calidad panadera (MacRitchie y Wrigley, 1986). Según Jones et al. (1982) la falta de S en los forrajes influye en el crecimiento de los rumiantes.

I.14. Cloro.

El cloro es absorbido por la planta bajo la forma Cl^- , no sólo por vía radicular, sino también por sus partes aéreas. Sus requerimientos fisiológicos son bajos, del orden de unas 5 ppm.

Presenta una gran movilidad, y una vez absorbido emigra fácilmente hacia las partes en actividad fisiológica. Se encuentra principalmente bajo la forma de cloruro, y sólo en muy pequeña proporción formando parte de compuestos orgánicos. El bromo, a concentraciones más elevadas que el cloro (unas diez veces superior) puede sustituirle en parte, pero no totalmente (Navarro, 2000).

A partir de estudios realizados sobre cloroplastos aislados, se determinó que el cloro era necesario para la evolución del oxígeno durante la fotosíntesis (Warburg y Luttgens, 1946). Sin embargo, hoy día se duda que sea absolutamente necesario para esta función, ya que se ha comprobado que su carencia en remolacha azucarera provoca una importante reducción del crecimiento debido a su influencia sobre la división celular y, consecuentemente, sobre la superficie foliar, pero no influye en la actividad fotosintética por unidad de superficie foliar (Terry, 1977). Como el cloro es móvil y tolerado en concentraciones relativamente elevadas por los tejidos vegetales, puede jugar también un papel importante como contrapunto del potasio y, por tanto, contribuir al potencial osmótico (Wild, 1992).

El cloro bajo la forma de cloruro se encuentra en los suelos en cantidades que pueden variar dentro de un amplio margen (entre 0 y 1000 kg Cl^-/ha). Ello depende de las sales solubles presentes, particularmente cloruro sódico, y en menor proporción cloruro cálcico y cloruro magnésico. En algunas ocasiones pueden alcanzarse cifras superiores al límite indicado, tal como ocurre en suelos cercanos a los mares y océanos, con un nivel freático bajo; los situados cerca de yacimientos salinos; o aquellos otros tratados de forma continua con aguas de alto contenido en cloruro y poco drenaje, donde puede almacenarse fácilmente. Normalmente todos los suelos tienen cantidades suficientes de cloruros para satisfacer las necesidades de las plantas. Proceden de la descomposición de la roca madre (rocas ígneas principalmente), de la degradación de restos orgánicos y también de las aportaciones que las lluvias efectúan, ya que el viento eleva a la atmósfera el agua del mar cargada de cloruros. Debido a su gran solubilidad, y a que se fija muy débilmente al complejo coloidal, vuelve al mar arrastrado por el agua de los ríos. Una pequeña parte puede insolubilizarse como cloruros de plata, mercurio, cobre o plomo, cuando las disoluciones se ponen en contacto con las partes superficiales de los minerales que contienen estos elementos. Por esta alta movilidad que presenta, su contenido en la mayor parte de los suelos agrícolas no suele ser alto (Navarro, 2000).

II. MATERIAL Y MÉTODOS

II. MATERIAL Y MÉTODOS.

II.1. Estudio del suelo.

Para la elaboración del estudio se han descrito y estudiado tres perfiles situados en cada una de las parcelas seleccionadas, éstas son, laboreo convencional, mínimo laboreo y siembra directa, localizadas en la Finca Experimental de Tomejil (Carmona, Sevilla, 30S0270630 UTM 4142526 y 78 m.s.n.m.). La toma de muestras de todos los horizontes de los tres perfiles fue posible gracias a una calicata en cada parcela de dimensiones 2 x 2 x 1,5 m de profundidad (Imagen II.1).



Imagen II.1. Calicata en la parcela de siembra directa.

Se eligió esta finca por estar situada en una zona de campiña típica de Andalucía, zona de amplia tradición agrícola y sus vertisoles o tierras negras andaluzas eran los suelos en los que se quería centrar este estudio. Además esta finca pertenece al centro Las Torres-Tomejil del Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica (IFAPA) y por tanto se podían llevar a cabo ciertas actuaciones necesarias para la investigación que en una finca de propiedad privada hubieran resultado más complejas.

En la elección de las parcelas se tuvieron en cuenta la concurrencia de una serie de factores ambientales:

- ✓ En primer lugar que las tres parcelas tuvieran el mismo tipo de suelo y que estuvieran sometidas a diferentes técnicas de cultivo.

- ✓ En segundo lugar que las tres parcelas tuvieran la misma orientación, pendiente y posición fisiográfica, para eliminar así posible variabilidad de factores ambientales que afectasen al estudio.
- ✓ En tercer lugar que llevaran el mismo tiempo con la técnica de cultivo aplicada en cada caso y la misma alternancia de cultivos. En las tres parcelas desde la década de los ochenta se produce una alternancia de trigo-girasol-leguminosa, siendo las técnicas de cultivo aplicadas laboreo convencional, mínimo laboreo y no laboreo o siembra directa.
- ✓ Por último, se tuvo en cuenta la buena accesibilidad vial de las parcelas, para facilitar así la toma de muestras, apertura de calicatas, etc.

II.1.1. Descripción de los perfiles.

La descripción de campo de cada uno de los perfiles se realiza en una ficha codificada modelo del Servicio de Evaluación de Recursos Naturales de la Dirección General de Planificación de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. En ella se describen parámetros asociados al suelo (para cada horizonte se anota el color, textura, estructura, consistencia, cementación, pedregosidad, porosidad, raíces, reacción, nódulos, revestimientos, límite) y a la unidad geomorfoedáfica (localización, morfogénesis, pendiente, elevación, relieve, erosión, drenaje, litología, pedregosidad, rocosidad, procesos geomorfológicos y uso actual) (Ficha 1).

De estas muestras se hizo una descripción macromorfológica de laboratorio.

Referencia				Perfil		
<input type="text"/>				<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Serie	Huso	X	Y	Sistema de clasificación		
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
LOCALIZACIÓN						
<input type="text"/>						
CLASIFICACIÓN						
<input type="text"/>						
OBSERVADOR						
<input type="text"/>						
Fecha	Elevación	Pendiente	Relieve	Erosión		
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>		
Drenaje	Pedregosidad					
<input type="text"/>	Frecuencia	Naturaleza litológica		Tamaño		
	<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>		
	Rocidad					
	Rocidad	Naturaleza litológica		Dureza		
	<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>		
	Material original					
	Material original	Período geológico	Posición fisiográfica			
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
	Uso actual	Nº de horizontes	Profundidad			
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Observaciones						
<input type="text"/>						

Ficha II.1.a. Anverso de la Ficha codificada modelo del Servicio de Evaluación de Recursos Naturales de la Dirección General de Planificación de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

PERFIL	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Orden	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Discontinuidad	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Horizonte	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Subíndices	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Límite superior	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Límite inferior	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<u>Color Munsell</u>							
En seco	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
En húmedo	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<u>Textura</u>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<u>Estructura</u>							
Tipo	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Clase	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Grado	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<u>Consistencia</u>							
Plasticidad	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Adhesividad	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
En húmedo	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
En seco	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<u>Cementación</u>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<u>Pedregosidad</u>							
Frecuencia	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Naturaleza	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Tamaño	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<u>Porosidad</u>							
Frecuencia	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Tamaño	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<u>Raíces</u>							
Frecuencia	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Tamaño	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<u>Reacción</u>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<u>Nódulos</u>							
Frecuencia	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Naturaleza	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<u>Revestimientos</u>							
Frecuencia	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Clase	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<u>Límite</u>							
Clase	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Forma	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Ficha II.1.b. Reverso de la Ficha codificada modelo.

II.1.2. Determinaciones analíticas del suelo.

a) Toma y preparación de las muestras de suelo.

Las muestras de cada horizonte de suelo se recogieron utilizando bolsas de polietileno, dejándolas posteriormente secar a temperatura ambiente, extendiéndolas sobre papel en el laboratorio. Tras su secado se procedió a la cuantificación de la grava y a la rotura de los agregados con rodillo de madera. Posteriormente se separó la grava haciendo pasar la muestra a través de un tamiz de 2 mm de luz de malla. Después se pesaron todas las fracciones resultantes, guardándolas, finalmente, en cajas de cartón debidamente etiquetadas.

b) Determinación del pH.

Para la determinación del pH se ha utilizado un pH-metro. Se toma medida del potencial eléctrico que se crea en la membrana de vidrio de un electrodo, que es función de la actividad de los iones hidrógeno a ambos lados de la membrana (Métodos oficiales de análisis, 1994).

El procedimiento es pesar 10 g de suelo y añadir 25 mL de agua destilada. Posteriormente se introducen los electrodos en el líquido sobrenadante, evitando la formación de burbujas y se mide el pH en la pasta saturada.

Para la determinación del pH en cloruro potásico se procede de igual manera pero utilizando ClK 0,1 M en lugar de agua.

c) Determinación de la conductividad.

El procedimiento consiste en la medida potenciométrica del extracto acuoso del suelo con un conductímetro. La preparación del extracto acuoso puede hacerse a diferentes grados de dilución, variando la conductividad de ésta, por lo que ha de fijarse en toda determinación la relación suelo/agua. En este estudio se tomó la relación 1/5, para lo que se pesan 50 g de suelo y se mezclan con 250 mL de agua destilada, se agita durante una hora en una botella de 1L, se filtra y en el extracto claro se mide la conductividad.

d) Determinación de carbono orgánico y materia orgánica total.

Se determina el carbono orgánico del suelo que se oxida con dicromato en presencia de ácido sulfúrico. El exceso de oxidante se valora con sulfato ferroso amónico (sal de Mohr) y la cantidad de carbono orgánico oxidado se calcula a partir de la cantidad de dicromato reducido (Métodos oficiales de análisis, 1994).

El procedimiento consiste en pesar una muestra de tierra fina triturada de 0,5 g y colocarla en un matraz erlenmeyer de 500 mL. Añadir 10 mL de dicromato potásico 1 N imprimiendo un movimiento de giro al matraz para asegurar una mezcla íntima con el

suelo. Después añadir, lentamente y agitando, 20 mL de ácido sulfúrico concentrado dejando la muestra en reposo durante 30 minutos sobre una placa de amianto. Añadir 200 mL de agua, dejar enfriar y agregar 10 mL de ácido fosfórico concentrado. Valorar con sal de Mohr.

Para determinar el contenido de materia orgánica del suelo (Duchafour, 1975), se multiplica el contenido de carbono por el factor de conversión 1,724, expresándose el resultado en gramos de materia orgánica total por kilogramo de suelo.

e) Determinación de la textura.

La textura de los diferentes horizontes de los tres perfiles se ha realizado de acuerdo con el método de la pipeta (Métodos oficiales de análisis, 1994) que está basado en el hecho de que la sedimentación elimina en una zona de profundidad h , y en un tiempo t , todas las partículas cuyas velocidades de sedimentación sean mayores de h/t , mientras que las partículas que tengan velocidades de sedimentación inferiores a la citada se mantienen en dicha zona a la concentración original. Con este método se consigue determinar las fracciones de la arena utilizando tamices con diferente luz de malla.

Previa a la suspensión del suelo en una solución alcalina diluida de hexametáfosfato sódico, que permita la dispersión de los agregados, se elimina la materia orgánica de las muestras tratándolas con peróxido de hidrógeno, para evitar la resistencia que ofrece la materia orgánica a la dispersión.

La clase textural se determina posteriormente mediante el diagrama triangular o diagrama de texturas.

f) Determinación del color.

Para la determinación del color, tanto en seco como en húmedo, se ha seguido el sistema Munsell Color Charts (1954).

g) Determinación del nitrógeno total.

Se ha seguido el método de Kjeldahl (Métodos oficiales de análisis, 1994) consistente en transformar el nitrógeno del suelo en sales amónicas mediante digestión en ácido sulfúrico, utilizando catalizadores para acelerar la reacción. Las sales amónicas formadas se tratan con hidróxido sódico formándose amoniaco que, mediante arrastre de vapor, se lleva sobre una disolución de ácido bórico, para valorarse posteriormente por retroceso con ácido sulfúrico de titulación conocida.

El procedimiento consiste en introducir 5 g de suelo en un matraz Kjeldahl al que se añade 20 mL de ácido sulfúrico concentrado, que contenga H_3PO_4 al 3%, y sobre una pequeña cantidad de catalizador metálico (bisulfato potásico y sulfato de cobre y selenio).

Se coloca en una unidad digestora Kjeldahl prolongando la reacción hasta clarificación. Una vez conseguida ésta y, previo reposo para enfriar, se conecta el matraz a la unidad de destilación Kjeldahl, añadiendo 50 mL de agua destilada e hidróxido sódico al 40% hasta desplazar todo el amoníaco.

El destilado se recoge en el matraz de valoración sobre 20 mL de ácido bórico al 5%, con unas gotas de indicador mixto (verde de bromocresol 0,1% y rojo de metilo 0,1% 5:1), continuando la destilación hasta obtener 100 mL de disolución final que presenta un color verde claro. Se realiza una valoración con ácido sulfúrico 0,05 N hasta nuevo viraje a violeta.

h) Determinación de los carbonatos.

El método se basa en que tras el tratamiento de los carbonatos con ácido en un dispositivo cerrado, a presión y temperatura constante, el incremento del volumen es una medida directa del CO₂ desprendido (Métodos oficiales de análisis, 1994).

Se pesan de 0,25 g de muestra en un matraz erlenmeyer de 50 mL, se introduce en el mismo un pequeño tubo de ensayo con 5 mL de ácido clorhídrico 1:1, teniendo cuidado de que no se vierta el contenido; se tapa el erlenmeyer, se vierte el ácido sobre la muestra, y se recoge el CO₂ desprendido en un dispositivo medidor de volúmenes (calcímetro de Bernard).

A continuación se repite la misma operación con 0,25 g de carbonato cálcico R. A. de la relación de volúmenes desprendidos, se deduce la cantidad de carbonatos totales presentes en el suelo analizado.

i) Determinación del fósforo.

Se trata de extraer el fósforo del suelo con NaHCO₃ 0,5 M a un pH aproximadamente constante de 8,5. En los suelos calizos, alcalinos o neutros que contengan fosfatos cálcicos, aumenta la concentración de P en la solución extractora por precipitación de Ca como CaCO₃. En los suelos ácidos que contengan fosfatos de hierro y aluminio, la concentración de P en la solución aumenta conforme el pH se eleva. La concentración del complejo de color azul formado por la reducción, con ácido ascórbico, del fosfomolibdato obtenido cuando el molibdato amónico reacciona con el fósforo en medio ácido, en presencia del ión antimonio, se mide espectrofotométricamente a 882 nm (Métodos oficiales de análisis, 1994).

Se pesan 5 g de la muestra y se añaden 100 mL de solución extractora de bicarbonato sódico 0,5 M en un erlenmeyer de 250 mL. Se agita durante media hora y se filtra posteriormente a través de un papel de filtro Whatman número 40.

Para la determinación se vierten alícuotas de 10 mL de los extractos en vasos de precipitado de 100 mL, añadiendo a continuación H₂SO₄ 1,5 M para conseguir pH 5. Añadir agua hasta 42 mL y completar a un volumen total de 50 mL, añadiendo finalmente

8 mL del reactivo de molibdato amónico, tartrato amónico, H₂SO₄ 5N y ácido ascórbico. Se lee a 882 nm y se lleva el resultado frente a la curva patrón.

- j) Determinación de la capacidad de intercambio catiónico y de los macroelementos cambiables (Na, K, Ca, Mg).

El método consiste en saturar el suelo con iones sodio mediante tres lavados sucesivos con acetato sódico 1 N a pH 8,2. El exceso de sal se elimina del suelo y el sodio absorbido se desplaza con acetato amónico 1 N, en cuya solución se determina sodio (Métodos oficiales de análisis, 1994).

En un tubo de centrifuga se introducen 5 g de suelo, se añaden 33 mL de acetato sódico, se agita durante cinco minutos y posteriormente se centrifuga durante 5 minutos a 1000 rpm hasta que el líquido sobrenadante esté claro. Se decanta el líquido sobrenadante y en él se determinan calcio y magnesio por espectrofotometría de absorción atómica y potasio por espectrofotometría de llama.

Se repite este procedimiento hasta un total de tres tratamientos. A continuación se prepara una suspensión de la muestra en 33 mL de etanol al 95% y se vuelve a agitar durante cinco minutos, se centrifuga y se decanta el líquido sobrenadante. Se lava la muestra hasta que la conductividad eléctrica no exceda de 40000 dS/m.

El sodio absorbido en la muestra se desplaza con tres adiciones de acetato amónico 1 N, seguidos de agitación, centrifugación y decantación como en el apartado anterior. La concentración de cationes intercambiables se determina por fometría de llama.

Para determinar el sodio cambiante, a 5 g de suelo se le añaden 3 veces 33 mL de acetato amónico 1 N, se agita durante 5 minutos y se centrifuga igual periodo de tiempo, decantando el líquido sobrenadante, y determinando en él el sodio por fometría de llama.

- k) Determinación de los macroelementos asimilables (Ca, Mg, Na, K).

El método se basa en la extracción de los elementos asimilables del suelo por una solución extractora (acetato amónico 1 N a pH 7) y su posterior determinación por espectrofotometría de absorción atómica o de llama (G.T.N.M.A., 1976).

Se introducen 5 g de suelo seco al aire en un frasco de agitación con 200 mL de solución extractora. Se agita el conjunto durante dos horas en agitador rotatorio y a continuación se filtra a gravedad y se lleva el extracto a un frasco de polietileno.

El sodio y el potasio se determinan por fometría de llama construyendo una curva patrón a partir de disoluciones de sodio y potasio de concentración conocida.

El calcio y el magnesio se determinan por espectrofotometría de absorción atómica, construyendo igualmente la curva patrón con disoluciones de concentración conocida de calcio y magnesio.

l) Determinación de oligoelementos (Fe, Cu, Mn, Zn).

El método se basa en la extracción de los microelementos asimilables del suelo con una solución de AEDT 0,05 N y posterior determinación espectrofotométrica (Pinta, 1971).

Se introducen 15 mg de suelo en un frasco de agitación y se añaden 75 mL de solución extractora agitando el conjunto durante una hora. Se filtra la suspensión a gravedad y en el filtrado se determinan Fe, Cu, Mn y Zn por espectrofotometría de absorción atómica.

m) Densidad aparente.

Para el cálculo de la densidad aparente se ha empleado la ecuación de regresión múltiple obtenida por Santos (1979):

$$D.A. = 1,5456 + 0,0015 (\%arena) - 0,0022 (\%arcilla) - 0,1219 (\% \text{ carbono orgánico})$$

n) Retención de agua a 1/3 y 15 atmósferas.

Se utilizó el método de la membrana de Richards (1.947), para dos presiones distintas: 1/3 y 15 atmósferas.

II.1.3. Determinación de arcillas. Difracción de rayos X.

Los diagramas de difracción de rayos X de las distintas muestras se registraron en un difractómetro Siemens modelo D5000 (del departamento de Química Inorgánica e Ingeniería Química de la Universidad de Córdoba), controlado por el sistema informático DifraccPlus BASIC 4.0, provisto de un monocromador de grafito y detector de tipo proporcional. La radiación utilizada fue $\text{Cu K}\alpha_{1,2}$ ($\lambda_1 = 1,54439 \text{ \AA}$ y $\lambda_2 = 1,54439 \text{ \AA}$) y las condiciones de registro fueron 40 kV y 30 mA en la modalidad de barrido por pasos entre 5° y 65° (2θ). Para fines de identificación de fases, el ancho de paso fue de 0.02° (2θ) y tiempo de registro 0.6 segundos por paso.

Para la determinación semicuantitativa de los diferentes minerales de la mezcla por difracción de rayos X se sigue el método simplificado de Martín (1968), haciendo uso de los poderes reflectantes de los minerales.

El método puede aplicarse tanto a diagramas en polvo como de agregados orientados. Los poderes reflectantes de casi todos los minerales de la arcilla han sido determinados por varios autores y pueden encontrarse en Galán y Espinosa (1974) y Montealegre (1976) buenas recopilaciones. En el presente trabajo se ha hecho uso de los poderes reflectantes que aparecen en la tabla II.1.

MINERAL	d (Å)	PODER REFLECTANTE
Caolinita	7	1
Clorita	4,7	0,4
Ilita y Mica	10	0,5
Montmorillonita	17	2
Vermiculita	14	2,8
Cuarzo	3,33	1
Cuarzo	4,26	0,2

Tabla II.1. Poderes reflectantes.

Respecto a la medida de las áreas de los picos se han seguido los criterios de Montealegre (1976) referentes a la línea de base y al posible solapamiento de los mismos.

La separación de la fracción arcilla de las muestras de suelo se realizó según el método de la pipeta de Robinson descrito en los Métodos Oficiales de Análisis (M.A.P.A., 1994).

Una vez seca la fracción arcilla se tritura en un mortero de ágata hasta un tamaño de partícula pequeño y homogéneo.

Para la identificación de los diferentes minerales de la fracción arcilla presentes en cada uno de los horizontes de los tres perfiles estudiados se sometieron las fracciones arcilla a distintos tratamientos:

- 1) Tratamiento con disolución 1M de $MgCl_2$ durante 5 horas, lavando posteriormente hasta que el líquido sobrenadante no dio reacción de cloruros (con $AgNO_3$). Se prepararon films orientados y se introdujeron en el difractómetro obteniendo los difractogramas correspondientes.
Posteriormente se sometieron los films orientados a una atmósfera saturada de etilenglicol en un desecador durante 1 día y se volvieron a pasar por el difractómetro, obteniendo nuevos difractogramas.
- 2) Tratamiento con disolución 1M de KCl durante 5 horas, lavando posteriormente hasta que el líquido sobrenadante no dio reacción de cloruros (con $AgNO_3$). Se prepararon films orientados y se introdujeron en el difractómetro obteniendo los difractogramas correspondientes.
Posteriormente se introdujeron los portas con film orientado en una mufla y se calentaron a $550^\circ C$ durante 3 horas, realizando a continuación un nuevo difractograma.

El objetivo de los distintos tratamientos es poder discriminar la existencia de algunos minerales de la arcilla, según cambie o se mantenga su espaciado basal de un difractograma a otro (Tabla II.2).

Tratamiento	Caolinita	Mica	Esmectita	Vermiculita	Clorita
Distancia inicial	7Å	10 Å	12 Å	14 Å	14 Å
Etilenglicol	7Å	10 Å	17,5 Å	>14 Å	14 Å
KCl	7Å	10 Å	12,5 Å	10,5 Å	14 Å
550°C	desaparición	10 Å	10 Å	10 Å	14 Å

Tabla II.2. Espaciado basal de diferentes minerales de la arcilla según a que tratamiento se sometían.

II.2. Diseño de la experimentación.

II.2.1. Toma y preparación de las muestras inalteradas del suelo.

La toma de muestra de solución del suelo se iba a realizar in situ y de manera repetida en cada una de las tres parcelas delimitadas en la finca Tomejil. Sin embargo el año agrícola comenzó seco en septiembre con sólo 1,2 L de precipitación y continuó de igual manera a partir de octubre. Únicamente los meses de octubre con 83,4 L, y febrero con 50,4 L, superaron los 50 L de precipitación, recibiendo 7 meses precipitaciones con valores inferiores a los 3 L. En la siguiente tabla se indican los valores de las precipitaciones, en L, de todos los meses del año agrícola 2004-2005 (Tabla II.3).

MES	PRECIPITACIÓN (mm)	MES	PRECIPITACIÓN (L)
Sep-04	1,2	Mar-05	25,8
Oct-04	83,4	Abr-05	2,2
Nov-04	2	May-05	26,2
Dic-04	34	Jun-05	0
Ene-05	0,6	Jul-05	0
Feb-05	50,4	Ago-05	0

Tabla II.3. Precipitaciones (L) caídas en la Finca Experimental Tomejil durante el año agrícola 2004 – 2005.

Por consiguiente fue imposible realizar la experiencia en campo, así que hubo que tomar muestras inalteradas de suelo y provocar en ellas lluvia simulada para poder realizar el estudio.

Antes de tomar las muestras de suelo inalterado se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica con el fin de obtener información acerca de esta metodología.

En diversos estudios centrados en la zona no saturada se han realizado experimentos con columnas de suelo. Las dimensiones de las mismas oscilaban entre 0,10 y 1,60 m de longitud y 0,02 y 0,40 m de diámetro. Para la toma de estas muestras generalmente se utilizaban tubos de PVC por ser este un material barato y disponible en el mercado en múltiples dimensiones por ser el utilizado en conducciones hidráulicas (Álvarez-Benedí et al., 2001; Hernández et al., 2003; López et al., 2005; Orihuela et al., 2005), a la hora de introducir el tubo en el suelo para la toma de la muestra generalmente se ha utilizado un martillo si las dimensiones y las características del terreno lo permitían y en caso contrario se ha utilizado el mecanismo hidráulico de un tractor. Otros materiales utilizados con igual fin ha sido el acero inoxidable (Candela et al. 2003) y el metacrilato (Montoya y Martín, 2005; Massana et al, 2005).

En esta experiencia las dimensiones de la columna, de base rectangular, son de 0,60 m de alto, 0,40 m de ancho y 0,25 m de fondo (Imagen II.2) Éstas estaban así determinadas por la profundidad de los horizontes en un caso, ya que se quería abarcar los dos horizontes superficiales (hasta 24 cm el superficial y hasta 60 el siguiente), por ser en éstos en los que las

diferentes técnicas agrícolas generan o no alteración y por lo tanto los que son distintos de una parcela a otra, mientras que el siguiente horizonte es igual en los tres casos por estar situado a mayor profundidad que la labor realizada a más profundidad, esto es, 40 cm en el caso del laboreo convencional. Y por las dimensiones de sondas y TDR en el caso de la anchura y el fondo, ya que había que introducirlos en las columnas evitando interferencia entre ellos.

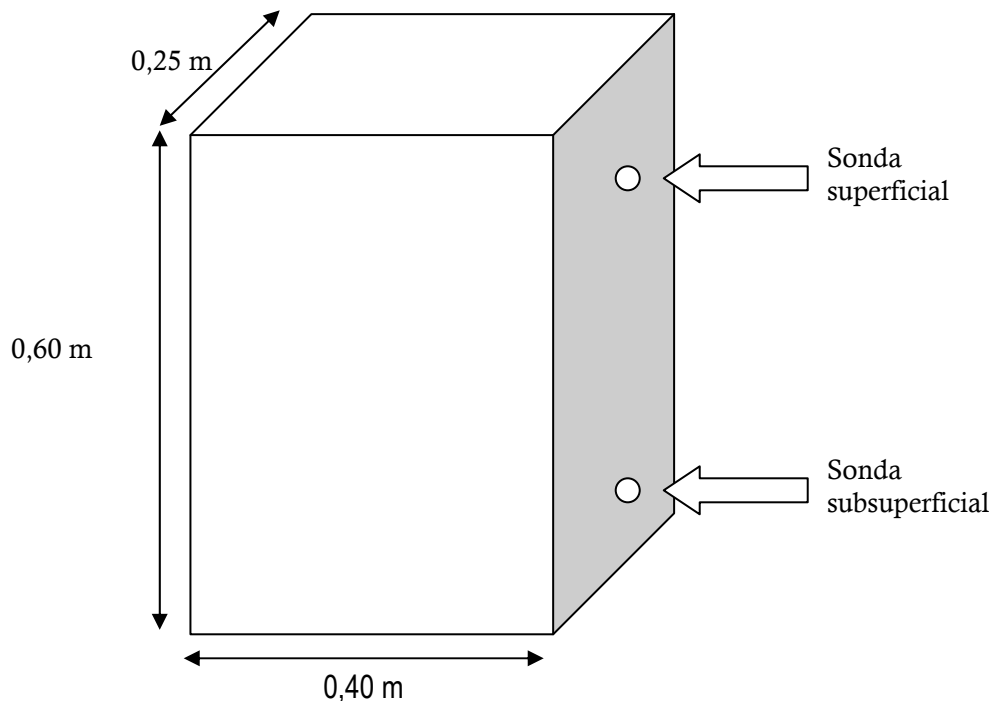


Imagen II.2. Esquema de la columna de muestra inalterada de suelo. Dimensiones y puntos de localización de las sondas extractoras de solución el suelo.

Debido a las dimensiones no era posible introducir la columna de forma manual. No existía la posibilidad de utilizar el mecanismo hidráulico de un tractor, ya que en seco este suelo está agrietado con lo cual se desmoronaría la muestra y en húmedo las arcillas están hinchadas y con la presión ejercida al tomar la muestra ésta se compactaría y por consiguiente se originaría la alteración en la estructura del suelo, porosidad y permeabilidad, con lo que esta muestra no serviría para este estudio.

Por tanto, el mecanismo de toma de muestra fue similar al de las cajas Kubiena (1938) sólo que las dimensiones de las cajas eran diferentes.

Para poder tomar las muestras de suelo se procedió a humedecer una de las caras de la calicata tanto frontalmente como desde la superficie, ya que una de las propiedades de estos

suelos vérticos es su plasticidad en húmedo y, por tanto, una mayor facilidad para poder trabajar con ellos.



Imagen II.3. Punto de partida (3 caras) de los armazones de las columnas de muestra inalterada.

Una vez húmedo, desde dentro de la calicata, se fueron abriendo dos hendiduras perpendiculares a la cara elegida, a una distancia una de otra de 0,40 m. Dichas hendiduras eran de 0,25 m de profundidad por 0,65 m de altura, para adaptarse a las dimensiones prefijadas de las columnas (Imágenes II.3, II.4 y II.5). En cada una de las caras de la muestra se introdujo una plancha de madera, forrada con papel, que sirvió de armazón de la misma. Una vez realizadas las dos incisiones en el suelo se procedió a colocar tres de las planchas que posteriormente conformarían el cubo, esto es, la de la cara de la calicata y los dos laterales que se habían creado (Imagen II.6). Para fijar las tablas entre sí se atornillaron y para que fueran conformando un auténtico armazón en torno a la muestra se aplicó espuma de poliuretano entre las tablas forradas con papel y el suelo (Imagen II.7). Una vez seca la espuma de poliuretano, desde la superficie, se abrió una zanja a mano para crear así la cuarta cara de la muestra (Imagen II.8). Una vez abierta ésta se colocó la tabla correspondiente y la de la base superior y se procedió de igual manera con los tornillos y la espuma de poliuretano que en las tres anteriores (Imagen II.9). Cuando la espuma de poliuretano estuvo seca se introdujo una plancha de acero en la base inferior para “cortar” la muestra de suelo, seguidamente se volteó la muestra y se le colocó la tabla que faltaba.



Imagen II.4. En la calicata, apertura de las dos primeras hendiduras a una distancia una de otra de 0,40cm y 0,25 de profundidad, dimensiones del armazón de partida de la Imagen II.3

Imagen II.5. Otra perspectiva de la imagen anterior.



Imagen II.6. Colocación del armazón de madera sobre el terrón ya definido.



Imagen II.7. La anterior con la aplicación de la espuma poliuretano y empezando la hendidura trasera para la cuarta cara de la columna.





Imagen II.8. Terminada la cuarta cara del terrón. Preparada para fijar la plancha de madera a las otras tres.



Imagen II.9. La columna con la cuarta y la quinta cara ya cubiertas y preparada para “cortarla” y obtener la muestra inalterada de suelo.

Las muestras de suelo inalterado fueron trasladadas a una finca en Villafranca de Córdoba. Una vez allí se quitó el armazón de madera y se reforzó la capa de poliuretano (Imágenes II.10, II.11, II.12 y II.13).



Imágenes II.10, II.11 y II.12. Diferentes caras de las muestras inalteradas sin plancha de madera y antes de reforzar la capa de poliuretano.



Imagen II.13. Refuerzo de la capa de poliuretano.



Imagen II.14. Realización de agujeros en la base para permitir el drenaje.

Las columnas de suelo con su molde de espuma de poliuretano y sin las planchas de madera se colocaron en una base de palets a unos 0,12 m del suelo. A la espuma de poliuretano de la base de cada muestra se le hicieron agujeros para que el drenaje en profundidad del agua de riego fuera posible (Imágenes II.14 y II.15).



Imagen II.15. Las columnas ya reforzadas y colocada sobre palets a 0,12 m del suelo.

II.2.2. Equipo extractor. Tomamuestras de succión de teflón-cuarzo.

Para la extracción de la solución del suelo era necesaria una técnica no destructiva y que muestreara la solución intersticial del suelo en condiciones de depresión controladas, por lo que se optó por sondas de succión.

Los tomamuestras de succión ofrecían dos variantes en cuanto al material, por un lado, estaban los de cerámica porosa y, por otro, los de teflón-cuarzo. En bibliografía ya existían estudios en los que se ponían de manifiesto diversas interferencias que ofrecían los tomamuestras de succión equipados con cerámica porosa en relación con la modificación de la composición química de la solución que circula por ellas. Grover y Lamborn (1970) observaron la liberación de iones calcio, sodio y potasio y la absorción de fósforo, esta última también descrita por Hansen y Harris (1975) y Nagpal (1982), este último indicaba que la capacidad de retención de fósforo y potasio es función de la concentración de la solución y del tiempo de contacto entre la solución del suelo y la cerámica. Por otro lado, Wagner (1962) señaló la absorción de ión amonio, fenómeno que es el resultado de un proceso mixto de absorción/deserción puesto de manifiesto por Bernhard y Schenk (1986). Si en muchos trabajos anteriores no existía un acuerdo general relativo a la liberación y absorción de ciertos elementos minerales, si que parece existir una cierta unanimidad a la hora de cuantificar su influencia en el muestreo de nitratos (Sánchez- Pérez y Morel, 1994). Las cápsulas de succión en cerámica porosa no perturban o perturban muy poco la composición en nitratos y nitritos de la solución extraída (Wagner, 1962; Hansen y Harris, 1975; Nagpal, 1982). Por todo ello junto con la mayor resistencia a la rotura que ofrecían los tomamuestras equipados con teflón-cuarzo la elección fue de estos últimos. En la siguiente tabla se muestra una comparación realizada por Sánchez-Pérez (1994) de las características de los dos tipos de tomamuestras de succión (Tabla II.4).

	CERÁMICA POROSA	CÁPSULA DE TEFLÓN
Material poroso	Cerámica	Teflón
Tamaño del poro	0,4 μ	1,5-30 μ
Toma de muestra	Succión	Succión y/o presión
Longitud de la cápsula	0,30-1,50 m	0,44 cm
Diámetro de la cápsula	30-63 mm	48,3 mm
Material del tubo	PVC-teflón	Teflón
Profundidad máxima	15 m	6-10 m
Volumen de muestra	100 cm ³	100 cm ³
Calidad de la muestra. Elementos mayores	Precaución, buena para nitratos	Buena
Calidad de la muestra. Metales traza	Intercambio iónico. Mucha precaución	Buena
Parámetros físico-químicos	Mucha precaución	Bueno
Comentarios	Bajo costo. Buen método de muestreo de nitratos	Caro. Utilización limitada a suelos húmedos
Fabricante	Soil Moisture corp., P.O. Box 30025, Santa Bárbara, CA 93105, USA.	Eljkelkamp Agrisearch Equipment, P.O. Box 4. 6987 Z6 Glesbeek, The Netherlands.

Tabla II.4. Comparación realizada por Sánchez-Pérez (1994) de las características de los dos tipos de tomamuestras de succión.

Los tomamuestras de succión están equipados por una cápsula de cuarzo prolongada por un tubo de teflón (Imagen II.16) y cerrado por un tapón equipado con dos tubos de plástico (Imagen II.17) por los que se realiza el vacío en el tomamuestras y el muestreo de la solución del suelo (Imágenes II.18 y II.19) Los tomamuestras se pueden introducir en el suelo vertical, horizontal o subhorizontalmente, según la profundidad a la que se desee llegar y las características del terreno.



Imagen II.16. Tomamuestras de succión, equipados por una cápsula de cuarzo prolongada por un tubo de teflón.



Imagen II.17. Tomamuestras de succión conectado al tapón de doble entrada.



Imagen II.18. Tomamuestras de succión conectado mediante el tapón de doble entrada al recipiente donde se recoge la muestra.



Imagen II.19. Equipo de succión completo: Sonda de teflón-cuarzo, tapón de doble entrada, recipiente y bomba de vacío.

En este caso a cada una de las muestras de suelo inalterado se le introdujeron dos sondas extractoras de solución del suelo de teflón-cuarzo. Las dos se pincharon sobre la misma cara de la muestra, de forma horizontal, pero cada una a una profundidad. Una de

ellas situada a 0,12 m de la superficie para poder extraer la solución procedente del horizonte superficial y la otra a 0,55 m para extraer solución en profundidad (Imagen II.20). Para introducirlas, primero se realizó un orificio y se extrajo el material original, posteriormente se fabricó una pasta con ese suelo, harina de sílice y agua destilada, esta pasta fue introducida antes que la sonda y también después a modo de sellador del orificio. Se dejó un tiempo de espera de dos meses para favorecer la restauración del equilibrio de las sondas con el suelo y la solución del mismo.

Las sondas se conectaron a un recipiente que recogiera la solución extraída mediante un tapón de doble entrada, para que por la otra se pudiera conectar una bomba de succión y así poder efectuar vacío en el conjunto botella-sonda y comenzar la succión de la solución del suelo (Imágenes II.21 y II.22).



Imagen II.20. Dos sondas pinchadas en la misma cara de una muestra a diferentes profundidades.



Imagen II.21. Sonda conectada al recipiente protegido con papel de aluminio de la luz solar.

Para proteger de la incidencia de la luz solar las botellas en las cuales se recogía la muestra de solución del suelo estaban envueltas en papel de aluminio y las muestras disponían de unas tapas protectoras.



Imagen II.22. Bomba haciendo vacío en el conjunto botella-sonda.

II.2.3. Time Domain Reflectometry (TDR).

Una vez instalado todo el equipo muestreador se procedió a la saturación de las muestras, para ello se aplicó riego diario en superficie. Mediante un TDR (*Time Domain Reflectometry*) se medía la humedad tanto en superficie como en profundidad, hasta que en los dos puntos se obtuvo el valor de la humedad de saturación.

El *time-domain reflectometry* (TDR) es un método exacto y automatizado para la determinación del contenido en agua de los medios porosos y de la conductividad eléctrica. El contenido en agua se deduce de la constante dieléctrica del medio, mientras que la conductividad eléctrica, de la atenuación de la señal de TDR. La primera aplicación de TDR para medidas de agua fue divulgada por Topp et al. (1980).

Las ventajas principales de TDR sobre otros métodos de medida del contenido volumétrico en agua del suelo, según Jones et al. (2002), son:

- (i) exactitud superior dentro del contenido en agua del 1 o del 2%;
- (ii) los requisitos de la calibración son mínimos, en muchos casos la calibración específica de suelos no es necesaria;
- (iii) carencia del peligro de la radiación asociada a técnicas de sensores de neutrones o de las técnicas de gamma atenuación;
- (iv) TDR tiene una resolución espacial y temporal excelente; y

- (v) las medidas son simples de obtener, y el método es capaz de proporcionar medidas continuas con la automatización y la multiplexación.

El contenido volumétrico de humedad del suelo (θ_v) es el cociente entre el volumen de agua presente en el suelo y el volumen total de la muestra.

$$\theta_v = (V_w / V_s)$$

Es un parámetro adimensional, expresado como porcentaje (%) o como cociente (m^3/m^3). Así, $0,0 m^3/m^3$ corresponde a un suelo completamente seco, y el agua pura da una lectura de $1,0 m^3/m^3$. El contenido volumétrico de humedad de un suelo mineral húmedo y un suelo húmedo muy orgánico se aproximan a $0,5 m^3/m^3$ y $0,8 m^3/m^3$ respectivamente.

Históricamente, el contenido gravimétrico en agua del suelo (θ_g) era determinado usando:

$$\theta_g = (M_w / M_s)$$

donde, M_w es la masa de agua de la muestra del suelo y M_s es la masa total de la muestra seca.

Los contenidos gravimétricos en agua del suelo se pueden convertir en los contenidos volumétricos en agua del suelo usando la expresión:

$$\theta_g = \theta_v \cdot (\rho_w / \rho_s)$$

donde ρ_w es la densidad del agua (1.0) y ρ_s es la densidad volumétrica de la muestra del suelo. Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \theta_v &= \theta_g \cdot \rho_s \\ &= (M_w / M_s) \cdot (M_s / V_s) \\ &= (V_w / V_s) \end{aligned}$$

El modelo de TDR usado en este estudio ha sido el Thetaprobe ML2x con un datalogger HH2 moisture meter (Delta-T Devices. Cambridge, England) (Imagen II.23 y II.24) que mide el contenido volumétrico de humedad del suelo, θ_v , por un método establecido de respuesta a cambios en la constante dieléctrica. Estos cambios son convertidos en voltaje, que es proporcional al contenido de humedad del suelo en un rango amplio de trabajo.



Imagen II.23. Modelo de TDR usado en este estudio. Thetaprobe ML2x con un datalogger HH2 moisture meter (Delta-T Devices. Cambridge, England)



Imagen II.24. Modelo de TDR usado en este estudio.

Thetaprobe consiste en una caja impermeable, que contiene la parte electrónica, y en el extremo final posee cuatro varillas de acero inoxidable de 6 cm de longitud y 0,3 cm de diámetro, las cuales son introducidas en el suelo.

Trabajos publicados por Whalley (1993), White (1994), Zegelin (1989) y Topp (1980) muestran una correlación lineal entre la raíz cuadrada de la constante dieléctrica ($\sqrt{\epsilon}$) y el contenido volumétrico de humedad (θ_v), lo que ha sido documentado para muchos tipos de suelos. ThetaProbe mide el contenido volumétrico en agua del suelo mediante la determinación de la constante dieléctrica aparente, usando la ecuación siguiente:

$$\theta_v = (\sqrt{\varepsilon} - a_0)/a_1$$

donde ε es la constante dieléctrica y a_0 y a_1 son constantes dependientes del tipo de suelo (Delta-T Devices, Manual de usuario).

La sonda genera una señal sinusoidal a 100 MHz, que es aplicada a una línea de transmisión interna diseñada especialmente que se prolonga dentro del suelo a través de las cuatro varillas.

La impedancia del conjunto de varillas varía con la impedancia del suelo, la cual tiene dos componentes, la constante dieléctrica del suelo y la conductividad iónica.

La frecuencia de 100 MHz de señal ha sido elegida para minimizar los efectos de la conductividad iónica, así que cambios negativos en la línea de transmisión dependen, únicamente de la constante dieléctrica aparente del suelo. Esto es debido a que la constante dieléctrica del agua (81) es mucho más alta que el suelo (3- 5) y el aire (1); la constante dieléctrica del suelo es determinada principalmente por su contenido en agua.

La impedancia del conjunto de las varillas influye en la reflexión de la señal de 100 MHz y esa reflexión se combina con la señal aplicada para dar lugar a un voltaje, encontrándose una onda en la línea de transmisión.

El rendimiento de producción del Thetaprobe es un voltaje análogo proporcional a la diferencia de amplitud de esta onda encontrada en dos puntos, y ésta forma una medida de contenido de agua en el suelo, sensible y precisa.

El rendimiento de la señal es de 0 a 1 V para un rango de la constante dieléctrica del suelo, entre 1 y 32, que corresponde aproximadamente a un contenido volumétrico de humedad del suelo de 0'5 m³/m³ para suelos minerales (Delta-T Devices, Manual de usuario).

II.3. Estudio de la solución del suelo.

II.3.1. Toma y preparación de las muestras de solución del suelo.

Una vez saturado el suelo se dejó equilibrar la solución del suelo durante dos días y al tercero comenzó la extracción. El vacío se aplicaba en cada sonda una vez al día ya que su duración aproximada era de 24 horas, esta operación se repetía durante siete días, tiempo necesario para obtener el volumen de solución requerido para los ensayos posteriores. Los datos obtenidos en el acuífero Cuaternario de Vitoria-Gasteiz muestran cómo la composición de la solución recogida mediante tomamuestras de succión tomadas 1, 2, 7 ó 14 días después de la puesta en succión no presenta diferencias significativas. Los volúmenes de agua recogidos en el campo varían entre 0,2 y 1,2 L (Sánchez-Pérez y Morell, 1994).

Una vez recogida la muestra se dejaban dos días de descanso en la extracción para conseguir de nuevo el equilibrio de la solución del suelo. La aplicación de riego para mantener la saturación constante de las muestras era diaria, efectuándose tanto en los días de succión como en los días de descanso.

Las seis muestras de solución del suelo eran vaciadas a un recipiente de plástico color oscuro y opaco y conservadas en el frigorífico hasta su determinación en el laboratorio. De todas ellas se guardó una parte (100 mL) por si era necesario repetir algún análisis.

II.3.2. Determinaciones analíticas de la solución del suelo.

a) Determinación de bicarbonatos.

Se determina la alcalinidad con una solución normalizada de un ácido mineral fuerte, a los puntos sucesivos de equivalencia del anión carbonato (pH 8,3) y del anión bicarbonato (pH 4) (Métodos oficiales de análisis, 1994).

Para ello se transfiere una alícuota de la muestra a un vaso de 100 mL de capacidad. Se agregan 2 gotas de fenolftaleína y si el conjunto toma color rosa se determinar su pH. Si el valor es superior a 8,3 valorar con ácido sulfúrico 0,01 N sobre una superficie blanca, hasta que desaparezca el color. A continuación añadir 2 gotas de naranja de metilo y valorar con ácido sulfúrico hasta aparición del primer color anaranjado.

b) Determinación de sulfatos.

El sulfato se precipita como sulfato cálcico en presencia de acetona. El sulfato cálcico es posteriormente separado por centrifugación y redisolto en agua. En la solución acuosa se determina la cantidad de sulfato por valoración del calcio con versanato (Métodos oficiales de análisis, 1994).

Se transfiere una alícuota de la muestra que contenga de 0,01 a 0,1 meq de sulfato a un tubo de centrifuga de fondo cónico. Diluir o concentrar a 10 mL. Añadir una gota de rojo

de metilo y ácido acético gota a gota hasta que aparezca un color rosado permanente. Añadir 1 mL de CaCl_2 1 N y mezclar. Añadir 20 mL de acetona y mezclar. Dejar reposar durante 10 minutos, centrifugar después durante 5 minutos y decantar el líquido sobrenadante. Drenar sobre papel de filtro, añadir 10 mL de acetona y disgregar el precipitado de las paredes del tubo. Centrifugar y drenar de nuevo. Añadir 10 mL de agua para disolver el precipitado. Valorar el Ca con EDTA.

c) Determinación de cloruros.

Se determina mediante una valoración con nitrato de plata en la que aparece un precipitado rojo de Ag_2CrO_4 (Métodos oficiales de análisis, 1994).

Para ello se toma una alícuota de la muestra y se valora con ácido sulfúrico hasta el punto de viraje con naranja de metilo. Después se añaden 4 gotas de solución de cromato potásico al 5%, y se valora, agitando al mismo tiempo bajo luz brillante, con nitrato de plata.

d) Determinación de Ca y Mg.

La determinación es directa por absorción atómica (Métodos oficiales de análisis, 1994).

Se introduce en un matraz aforado de 50 mL, 25 mL de la muestra y se añaden 2 mL de solución de lantano al 6,5%. Se completa a 50 mL con agua destilada. Se mide en el espectrofotómetro de absorción atómica y el resultado se interpreta frente a la curva patrón.

e) Determinación de K.

La determinación es por aspiración directa a la llama y lectura a 765 nm (Métodos oficiales de análisis, 1994).

El procedimiento consiste en dejar estabilizar el aparato. Seleccionar la longitud de onda aspirando a la llama adecuada la solución patrón de 100 mg K/L y recorrer cuidadosamente las proximidades de la longitud de onda teórica del potasio, hasta encontrar aquella en que se logra máxima respuesta.

Obtener las curvas de calibrado con la escala de patrones y a continuación aspirar la muestra y efectuar la lectura.

f) Determinación de Na.

La determinación es por aspiración directa a la llama y lectura a 586 nm (Métodos oficiales de análisis, 1994).

El procedimiento consiste en dejar estabilizar el aparato. Seleccionar la longitud de onda aspirando a la llama adecuada la solución patrón de 100 mg Na/L y recorrer

cuidadosamente las proximidades de la longitud de onda teórica del sodio, hasta encontrar aquella en que se logra máxima respuesta.

Obtener las curvas de calibrado con la escala de patrones y a continuación aspirar la muestra y efectuar la lectura.

g) Determinación de metales pesados (Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn, Hg y As).

Los metales pesados en la solución del suelo fueron determinados por métodos espectrofotométricos (Métodos oficiales de análisis, 1994).

II.4. Análisis estadístico de la solución del suelo.

El análisis estadístico de la solución del suelo se ha realizado mediante el software Statgraphics Centurión XV (Martín, 2001 y Pérez, 2003) con licencia 'Academic-Professional-Network', número C5A0-E1P1-Y030-K037-6947.

El estudio estadístico se ha realizado de forma individual para cada elemento analizado en las aguas extraídas del suelo y está dividido en tres partes. De forma que cada elemento se ha considerado como una variable.

- En primer lugar se han representado las Series Temporales, esto es, la secuencia de valores observados a lo largo del tiempo para cada técnica de laboreo y profundidad.

Con esto se pretende tener una visualización gráfica de los datos para todas las variables estudiadas. Además, para cada variable, se ha realizado la comparación de las Series Temporales de las tres técnicas de cultivo en los dos horizontes estudiados.

- En segundo lugar se ha realizado el Análisis de las Series Temporales (Fuller, 1996; Peña, 1998 y Peña, 2005) con el objetivo de comprobar la existencia de algún tipo de tendencia en los datos, así como la predicción de valores futuros.

Para la determinación de la tendencia se ha utilizado una técnica de suavización de las Series, o filtro. Las técnicas de suavización tienen por objetivo eliminar el "ruido", destacando así la tendencia de la serie. En este caso se ha aplicado una suavización mediante Medias Móviles a Cinco Términos, que se obtiene por la sustitución de cada término de la serie por la media de los cinco términos que la rodean (Fuller, 1996; Peña, 1998 y Peña, 2005).

Para la predicción de valores futuros se ha ajustado un modelo a cada Serie Temporal, para poder así emitir un pronóstico de comportamiento en el futuro. Los gráficos permiten además, en algunos casos, una mejor visualización de la tendencia. En cada caso se ha escogido la opción que mejor se ajusta a la serie de entre los modelos que son clásicos (Peña, 1998 y Peña, 2005) (modelo de medias constantes, camino aleatorio, tendencia lineal o modelos ARIMA) utilizando para discernir esta adecuación el conocido criterio de Akaike (Akaike, 1974). *El criterio de Akaike* fue desarrollado por Hirotugu Akaike en 1974 bajo el nombre de "an information criterion" (AIC) y es una medida de la bondad del ajuste que proporciona un modelo estadístico estimado. Se trata de un método operacional de equilibrar la complejidad del modelo estadístico frente a su fidelidad con respecto a los datos analizados. En el caso general el estadístico AIC adquiere la fórmula:

$$AIC = 2k - 2\ln(L),$$

donde k es el número de parámetros en el modelo estadístico y L es la función de verosimilitud.

A continuación se explican con más detalle los rasgos generales de estos modelos (Peña, 1998 y Peña, 2005):

- El *modelo de medias constantes* supone que el mejor pronóstico para valores futuros de la serie está dado por el promedio de los datos anteriores.
- El *ajuste por S-curvas* modeliza la serie empleando una curva de crecimiento de forma S ajustada en base a los datos disponibles de la serie.
- El *modelo de tendencia lineal* supone que el mejor pronóstico para valores futuros está dado por la recta de regresión lineal para los datos conocidos de la serie. Este modelo asume que el mejor pronóstico para datos futuros está dado por el valor del último dato disponible.
- *ARIMA* son las siglas de ‘*Modelos Autorregresivos Integrados de Medias Móviles*’ y fueron introducidos en los años 70 por G.E.P. Box de la Universidad de Lancaster con objeto de proporcionar mejores modelos matemáticos para el estudio de la contaminación en la bahía de San Francisco (Box y Jenkins, 1976).

Para este tipo de modelos, según Molinero (2004), el primer paso consiste en convertir la serie de observaciones en una serie estacionaria (aquella en la que ni la media, ni la varianza, ni las autocorrelaciones dependen del tiempo). Una vez “estabilizada” la serie mediante las transformaciones adecuadas, se procede a estudiar la presencia de regularidades en la serie, para identificar un posible modelo matemático. Para ello se calculan las funciones de autocorrelación simple y parcial, y se compara su forma con un catálogo de patrones gráficos, que son típicos de los diferentes modelos propuestos, seleccionando el modelo que más se adecue a la forma de las funciones de autocorrelación que se han obtenido con los datos.

Una vez elegida la forma del modelo, se estiman los coeficientes del mismo, y finalmente se procede a efectuar un análisis de los residuos (diferencia entre el valor realmente observado y el valor previsto por el modelo), con el fin de comprobar si el ajuste del modelo a nuestros datos es adecuado. Si no lo fuera se repite el proceso buscando otros modelos.

Una vez determinado un modelo suficientemente válido, sobre la serie estacionaria, se procede a deshacer la transformación inicialmente efectuada para estabilizar la serie, y ahora comprobamos si los pronósticos del modelo son adecuados con los datos, volviendo a comenzar la búsqueda de otro

modelo si no fuera el caso. Puede, por tanto, tratarse de un proceso iterativo de mejora del modelo.

El modelo ARIMA está constituido por una combinación de modelos autorregresivos (modelos **AR**), en los que se emplean las observaciones anteriores de una variable para explicar el valor de la variable en el periodo actual, y de modelos de medias móviles (modelos **MA**), que estudian la influencia del ruido o error en períodos anteriores. La letra **I** que aparece en el nombre completo corresponde al proceso último que hay que realizar, una vez definido el tipo de modelo y estimados los coeficientes de éste, ya que entonces hay que reestablecer las características originales de la serie de datos, que fue transformada para inducir estacionaridad. A este proceso inverso se denomina Integración.

En la técnica ARIMA, se ajusta por un lado la tendencia de la serie y por otro se estudia el error con respecto a esta tendencia mediante modelos autorregresivos y de medias móviles. Los tres coeficientes de un modelo ARIMA(p,d,q) indican el orden de los métodos autorregresivos, de integración y de medias móviles empleados.

Finalmente, en este apartado, se incorpora una tabla con la recta de regresión para cada variable en cada tipo de laboreo y de profundidad mediante la que se puede detectar con precisión el carácter creciente o decreciente de la posible tendencia de la serie sin más que observar el coeficiente que acompaña a la variable t en cada caso (coeficiente positivo implica crecimiento, mientras que negativo supone decrecimiento). La recta de correlación lineal es la recta que menor error cuadrático ofrece para los datos conocidos de la serie. Viene a ser la recta que mejor ajusta a los datos en cuestión.

- En tercer lugar se realiza el Análisis de la Varianza (ANOVA) (Calot, 1988; Ruiz-Maya y Martín, 1995; Peña, 1999;). El ANOVA se puede realizar siempre y cuando las variables muestren un comportamiento aleatorio que pueda asimilarse a un a variable normal. Se utiliza para determinar la influencia sobre las variables de la técnica de laboreo y de la profundidad de extracción de solución del suelo.

Los test y coeficientes analizados son los siguientes (Calot, 1988; Ruiz-Maya y Martín, 1995; Peña, 1999;):

- **Coefficiente de simetría (sesgo) estándar** (Fisher, 1915 y Fisher, 1921). Este coeficiente (que a veces también se denomina coeficiente de asimetría de Fisher) mide la simetría de la distribución de datos respecto a su valor medio. La fórmula de cálculo de coeficiente de simetría es:

$$g_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)s^3},$$

donde x_1, \dots, x_n son los datos de los que se dispone y \bar{x} el valor medio y s es la desviación estándar. La simetría o sesgo estandarizado, que se calcula mediante:

$$z_1 = \frac{g_1}{\sqrt{6/n}}$$

que convierte el valor g_1 calculado antes a un valor que tiene aproximadamente una distribución normal estándar (en muestras grandes). Al nivel de significancia del 5%, se podría declarar un sesgo significativo si z_1 cae fuera del intervalo $(-2,2)$.

– **Kurtosis estándar** (Kenney y Keeping (1962), Abramowitz y Stegun (1972) y Ruppert (1987)). La Kurtosis es una medida de lo picuda o plana que es la distribución de datos comparada con una curva con forma de campana. Se calcula mediante la expresión:

$$g_2 = \frac{n(n+1) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)s^4} - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}$$

Un valor igual a 0 de g_2 indica una forma de campana similar a la de la distribución normal. Por el contrario un valor positivo supondría una forma más picuda y un valor negativo, una forma más aplanada. La Kurtosis estándar se calcula mediante la fórmula:

$$z_2 = \frac{g_2}{\sqrt{24/n}}$$

y que convierte la Kurtosis en un valor similar al de una distribución normal estándar. Al nivel de confianza del 95%, si la kurtosis estandarizada cae dentro del rango $(-2,2)$ se obtiene una kurtosis propia de una distribución normal estándar.

– **Test de Kolmogorov-Smirnov** (Kolmogorov, 1933; Smirnov, 1939; Montel, 1968). El test de Kolmogorov-Smirnov permite comparar si la distribución de probabilidad subyacente a ciertos datos difiere o concuerda con una distribución de probabilidad hipotética que en general es la distribución normal. Para ello, se calcula la función de distribución empírica, dada por:

$$F_n(x) = \frac{\text{número de elementos en la muestra } \leq x}{n},$$

y entonces el estadístico de Kolmogorov-Smirnov viene dado por:

$$D_n = \text{Sup}_x |F_n(x) - F(x)|,$$

donde F es la distribución de probabilidad hipotética a la que se quiere estudiar si se ajustan los datos de los que disponemos.

– **Test de Shapiro-Wilk (1965)**. El test de Shapiro-Wilk comprueba si una muestra de datos x_1, \dots, x_n sigue una distribución normal. Este test estadístico se calcula mediante la siguiente expresión:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)} \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

donde $x_{(i)}$ es i -ésimo menor número de la muestra, \bar{x} es la media de la muestra y los coeficientes a_i se calculan a partir de la matriz de covarianza de cierto conjunto de variables independientes con distribución normal estándar. Si el valor del estadístico W es muy pequeño se puede rechazar la hipótesis de normalidad la cual se acepta en caso contrario.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

III.1. Estudio del suelo.

Tal y como se indica en el capítulo de Material y Métodos, en el estudio del suelo se describen los perfiles de las tres parcelas objeto de estudio (siembra directa, mínimo laboreo y laboreo convencional), se analizan las muestras de suelo de todos los horizontes descritos y se determinan de manera semicuantitativa las arcillas de los mismos.

III.1.1. Descripción de los perfiles.

Para la descripción de los perfiles se detallan una serie de datos referentes a la localización del perfil, descripción de las características del lugar donde se encuentra seguido de una descripción detallada (tabla III.1 para siembra directa, tabla III.2 para mínimo laboreo y tabla III.3 para laboreo convencional) y finalmente se rellena la ficha codificada modelo del Servicio de Evaluación de Recursos Naturales de la Dirección General de Planificación de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (Anexo I, Anexo II y Anexo III).

Ficha de descripción del perfil de siembra directa.

Fecha: 1/4/2005

Localización: Finca Tomejil

Hoja topográfica: 985 - CARMONA

Coordenadas: 30S0270630 UTM 4142526

Altitud: 78 m.s.n.m.

Posición Fisiográfica: llano (0 - 2%)

Topografía Circundante: <3% - Llano

Pendiente: 0%

Vegetación o Uso: cultivos de secano - herbáceos

Material Original: Margas – Mioceno Superior

Drenaje: deficiente (2)

Condiciones de Humedad: húmedo

Profundidad de la Capa Freática:

no se detecta

Pedregosidad: inexistente

Afloramientos Rocosos: nulos

Erosión: nula

Influencia Humana: agrícola (siembra directa)

Clasificación: Vertisol cálcico (Topolitomorfo)



Imagen III.1. Perfil en siembra directa.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción del perfil
Ap	0 - 24	Color en seco 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro y 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro en húmedo; arcilloso. Estructura en bloques subangulares, de media a gruesa, bien desarrollada. Plástico, adherente, firme, ligeramente duro; no cementado; sin piedras en el interior del horizonte, de frecuentes a abundantes poros, finos y medios, expedito e impedido, así como grietas de 1 a 2 mm de anchura, en todas las direcciones. Abundantes raíces finas y escasas medias (sobre los 20 – 22 cm se nota una acumulación de raíces finas); presenta efervescencia muy fuerte, escasas acumulaciones de CaCO ₃ de 1 – 2 cm de diámetro que no llegan a constituir nódulos calcáreos; no se observan cutanes. Límite gradual y plano.
Bw ₁	24 - 64	Color en seco 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro y 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro en húmedo; arcilloso. Estructura subpoliédrica, gruesa, bien desarrollada. Plástico, adherente, firme, duro; no cementado; sin piedras en el interior del horizonte; Frecuentes poros finos y medios, expedito; abundantes grietas, de 1 a 2 cm de forma alargada, en el sentido lateral del suelo, que dan lugar a pensar en una predominancia de la escorrentía lateral. Escasas raíces finas; efervescencia muy fuerte, acumulaciones de CaCO ₃ que no llegan a formar concreciones, son de forma alargada y rellenan grietas de las descritas anteriormente; cutanes de presión en la cara de los agregados situados en las grietas. Límite gradual y plano.
Bw _{2k}	64 - 140	Color en seco 2.5Y5/2 pardo grisoso y 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro en húmedo; arcilloso. Estructura poliédrica – prismática en bloques de tendencia paralelepédica, gruesos (~10 cm), bien desarrollados. Plástico, adherente, firme, duro; sin piedras en el interior del horizonte; Frecuentes poros finos, expedito, abundantes grietas de diversos tamaños y direcciones [en el límite de este horizonte y el anterior, se observan algunas concentraciones de materia orgánica (paja) sin alterar que remarcan el carácter vértico]. Efervescencia muy fuerte, abundantes concreciones (ojos blancos) de CaCO ₃ (10% – 15%) asimismo existen acumulaciones de CaCO ₃ relleno de grietas, incluso formando pequeñas bandas, cutanes de presión en las caras de los agregados (bloques). Límite brusco y plano.
Ck	140 →	Color en seco 2.5Y8/8 amarillo y 2.5Y7/8 amarillo en húmedo; arcilloso. Más del 60% del horizonte con estructura de roca alterada. Plástico adherente, firme y duro; sin piedras; compacto; no cementado; no se observan grietas ni restos de ellas, fuertemente calcáreo; ni concreciones, ni cutanes.

Tabla III.1. Descripción del perfil de siembra directa.

Ficha de descripción del perfil de mínimo laboreo.

Fecha: 1/4/2005

Localización: Finca Tomejil

Hoja topográfica: 985 - CARMONA

Coordenadas: 30S0270630 UTM 4142526

Altitud: 78 m.s.n.m.

Posición Fisiográfica: llano (0 - 2%)

Topografía Circundante: <3% - Llano

Pendiente: 0%

Vegetación o Uso: cultivos de secano - herbáceos

Material Original: Margas – Mioceno Superior

Drenaje: deficiente (2)

Condiciones de Humedad: húmedo

Profundidad de la Capa Freática: no se detecta

Pedregosidad: inexistente

Afloramientos Rocosos: nulos

Erosión: nula

Influencia Humana: agrícola (mínimo laboreo)

Clasificación: Vertisol cálcico (Topolitomorfo)



Imagen III.2. Parcela de mínimo laboreo.

Tabla III.2. Descripción del perfil de mínimo laboreo.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción del perfil
Ap	0 - 24	Color en seco 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro y 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro en húmedo; arcilloso. Estructura en bloques subangulares, de media a gruesa, bien desarrollada. Plástico, adherente, firme, ligeramente duro; no cementado; sin piedras en el interior del horizonte, de frecuentes a abundantes poros, finos y medios, expedito e impedido, así como grietas de 1 a 2 mm de anchura, en todas las direcciones. Abundantes raíces finas y escasas medias (sobre los 20 – 22 cm se nota una acumulación de raíces finas); presenta efervescencia muy fuerte, escasas acumulaciones de CaCO ₃ de 1 – 2 cm de diámetro que no llegan a constituir nódulos calcáreos; no se observan cutanes. Límite gradual y plano. Se detecta una pequeña capa entre los 3 y 5 cm superiores del suelo ligeramente más mullida, con la estructura más fina (como un subhorizonte incipiente) que incluso en algunas zonas muestra una grieta horizontal de separación con el material subyacente (diferencia de velocidad de secado)
Bw ₁	24 - 64	Color en seco 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro y 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro en húmedo; arcilloso. Estructura subpoliédrica, gruesa, bien desarrollada. Plástico, adherente, firme, duro; no cementado; sin piedras en el interior del horizonte; Frecuentes poros finos y medios, expedito; abundantes grietas, de 1 a 2 cm de forma alargada, en el sentido lateral del suelo, que dan lugar a pensar en una predominancia de la escorrentía lateral. Escasas raíces finas; efervescencia muy fuerte, acumulaciones de CaCO ₃ que no llegan a formar concreciones, son de forma alargada y rellenan grietas de las descritas anteriormente; cutanes de presión en la cara de los agregados situados en las grietas. Límite gradual y plano.
Bw _{2k}	64 - 140	Color en seco 2.5Y5/2 pardo grisoso y 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro en húmedo; arcilloso. Estructura poliédrica – prismática en bloques de tendencia paralelepédica, gruesos (~10 cm), bien desarrollados. Plástico, adherente, firme, duro; sin piedras en el interior del horizonte; Frecuentes poros finos, expedito, abundantes grietas de diversos tamaños y direcciones [en el límite de este horizonte y el anterior, se observan algunas concentraciones de materia orgánica (paja) sin alterar que remarcan el carácter vértico]. Efervescencia muy fuerte, abundantes concreciones (ojos blancos) de CaCO ₃ (10% – 15%) asimismo existen acumulaciones de CaCO ₃ relleno de grietas, incluso formando pequeñas bandas, cutanes de presión en las caras de los agregados (bloques). Límite brusco y plano.
Ck	140 →	Color en seco 2.5Y8/8 amarillo y 2.5Y7/8 amarillo en húmedo; arcilloso. Más del 60% del horizonte con estructura de roca alterada. Plástico adherente, firme y duro; sin piedras; compacto; no cementado; no se observan grietas ni restos de ellas, fuertemente calcáreo; ni concreciones, ni cutanes.

Ficha de descripción del perfil de laboreo convencional.**Fecha:** 1/4/2005**Localización:** Finca Tomejil**Hoja topográfica:** 985 - CARMONA**Coordenadas:** 30S0270630 UTM 4142526**Altitud:** 78 m.s.n.m.**Posición Fisiográfica:** llano (0 - 2%)**Topografía Circundante:** <3% - Llano**Pendiente:** 0%**Vegetación o Uso:** cultivos de secano - herbáceos**Material Original:** Margas – Mioceno Superior**Drenaje:** deficiente (2)**Condiciones de Humedad:** húmedo**Profundidad de la Capa Freática:** no se detecta**Pedregosidad:** inexistente**Afloramientos Rocosos:** nulos**Erosión:** nula**Influencia Humana:** agrícola (laboreo convencional)**Clasificación:** Vertisol cálcico (Topolitomorfo)

Imagen III.3. Perfil de laboreo convencional.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción del perfil
Ap	0 - 40	Color en seco 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro y 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro en húmedo; arcilloso. Estructura muy modificada por subsolado reciente, aunque se observan bloques subangulares medio-finos, bien desarrollada. Plástico, adherente, firme, ligeramente duro; no cementado; sin piedras en el interior del horizonte. Grandes grietas en todo el horizonte y todas direcciones de 1 a 5 cm apareciendo revueltas en profundidad raíces del año anterior en lo más profundo del horizonte (subsolado) por lo que no es significativa la descripción de poros, grietas y estructura. Se encuentran raíces o lombrices en los 20 cm superiores y está más “blando” que las otras parcelas; presenta efervescencia muy fuerte, escasas acumulaciones de CaCO ₃ , en forma de hifas. Límite brusco y plano.
Bw ₁	40 - 64	Color en seco 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro y 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro en húmedo, arcilloso. Estructura subpoliédrica, gruesa, bien desarrollada. Plástico, adherente, firme, duro; no cementado; sin piedras en el interior del horizonte; Frecuentes poros finos y medios, exped; abundantes grietas, de 1 a 2 cm de forma alargada, en el sentido lateral del suelo, que dan lugar a pensar en una predominancia de la escorrentía lateral. Escasas raíces finas; efervescencia muy fuerte, acumulaciones de CaCO ₃ que no llegan a formar concreciones, son de forma alargada y rellenan grietas de las descritas anteriormente; cutanes de presión en la cara de los agregados situados en las grietas. Límite gradual y plano.
Bw _{2k}	64 - 140	Color en seco 2.5Y5/2 pardo grisoso y 2.5Y4/2 pardo grisoso oscuro en húmedo, arcilloso. Estructura poliédrica – prismática en bloques de tendencia paralelepédica, gruesos (~10 cm), bien desarrollados. Plástico, adherente, firme, duro; sin piedras en el interior del horizonte; Frecuentes poros finos, exped, abundantes grietas de diversos tamaños y direcciones [en el límite de este horizonte y el anterior, se observan algunas concentraciones de materia orgánica (paja) sin alterar que remarcan el carácter vértico]. Efervescencia muy fuerte, abundantes concreciones (ojos blancos) de CaCO ₃ (10% – 15%) asimismo existen acumulaciones de CaCO ₃ relleno de grietas, incluso formando pequeñas bandas, cutanes de presión en las caras de los agregados (bloques). Límite brusco y plano.
Ck	140 →	Color en seco 2.5Y8/8 amarillo y 2.5Y7/8 amarillo en húmedo, arcilloso. Más del 60% del horizonte con estructura de roca alterada. Plástico adherente, firme y duro; sin piedras; compacto; no cementado; no se observan grietas ni restos de ellas, fuertemente calcáreo; ni concreciones, ni cutanes.

Tabla III.3. Descripción del perfil de laboreo convencional.

III.1.2. Resultados analíticos.

El suelo que se ha estudiado ha sido un vertisol cálcico (Topolitomorfo). La textura del mismo es arcillosa, con un porcentaje de arcilla superior a 75% en casi todos los horizontes. Son suelos de pH que oscila entre 7,3 y 7,67. El contenido en materia orgánica es superior al 1% en el horizonte superficial y va disminuyendo con la profundidad.

La saturación en bases es del 100% en los horizontes Bw de las tres técnicas de cultivo, siendo en el Ap de entre 80 y 90% en laboreo convencional y siembra directa y del 100% en mínimo laboreo.

De las tres técnicas de cultivo, siembra directa es la que presenta mayor contenido en arcillas en el horizonte superficial. En el resto de parámetros existe poca diferencia entre las tres técnicas de cultivo.

Los datos analíticos son los de las tablas III.4, III.5 y III.6. que aparecen a continuación.

PERFIL DE SIEMBRA DIRECTA (SD)

HORIZONTES. PROFUNDIDAD (cm)	Textura (%)					Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	pF	
	Arena Gruesa 2-0,05 mm	Arena Fina 0,05-0,2	Limo Grueso 0,05-0,02 mm	Limo Fino 0,02- 0,002 mm	Arcilla <0,002 mm			1/3 atm	15 atm
Ap (0-24)	0,88	2,11	6,85	11,47	78,69	95,8	1,27	59,0	47,2
Bw ₁ (24-64)	1,18	1,98	4,78	17,11	74,95	280,0	1,30	57,4	45,0
Bw ₂ k (64-140)	1,20	2,26	3,67	15,48	77,39	158,3	1,32	58,3	46,3
Ck (140→)	0,70	0,64	4,15	16,20	78,31	432,2	1,36	58,7	46,7

HORIZONTES. PROFUNDIDAD (cm)	pH (agua)	pH (KCl)	% CO ₃ ⁼	% M.O.	T	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	%V
					Macroelementos cambiables (meq/100g)					
Ap (0-24)	7,47	7,20	32,30	1,54	38,29	28,27	3,11	1,46	1,31	89,19
Bw ₁ (24-64)	7,30	7,06	21,28	1,21	31,61	25,39	3,92	1,24	1,07	100
Bw ₂ k (64-140)	7,61	7,23	25,60	0,83	29,33	21,55	5,40	1,96	0,42	100
Ck (140→)	7,67	7,20	28,50	0,15	53,91	23,78	4,61	3,64	0,39	60,14

HORIZONTES. PROFUNDIDAD (cm)	%N	P (ppm)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe	Mn	Cu	Zn
			Macroelementos asimilables (meq/100g)			ppm				
Ap (0-24)	0,09	0,010	38,71	5,18	8,46	1,69	0,0110	0,0090	0,0021	0,0044
Bw ₁ (24-64)	0,07	0,010	65,22	5,43	1,59	1,46	0,0142	0,0122	0,0020	0,0114
Bw ₂ k (64-140)	0,05	0,008	18,96	11,11	2,39	0,88	0,0143	0,0103	0,0019	0,0156
Ck (140→)	0,01	0,010	30,47	4,79	5,70	0,74	0,0064	0,0101	0,0020	0,0133

Tabla III.4. Resultados del análisis de las muestras de suelo en siembra directa.

PERFIL DE MÍNIMO LABOREO (ML)

HORIZONTES. PROFUNDIDAD (cm)	Textura (%)					Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	pF	
	Arena Gruesa 2-0,05 mm	Arena Fina 0,05-0,2	Limo Grueso 0,05-0,02 mm	Limo Fino 0,02- 0,002 mm	Arcilla <0,002 mm			1/3 atm	15 atm
Ap (0-24)	1,23	2,19	5,60	14,75	76,23	92,8	1,29	57,9	45,7
Bw ₁ (24-64)		2,15	4,20	17,10	74,60	218,0	1,30	57,2	44,7
Bw _{2k} (64-140)	1,71	2,00	3,85	15,43	77,01	159,1	1,32	58,2	46,1
Ck (140→)	0,94	0,70	4,10	16,30	77,96	315,0	1,37	58,6	46,6

HORIZONTES. PROFUNDIDAD (cm)	pH (agua)	pH (KCl)	% CO ₃ ⁼	% M.O.	T	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	%V
					Macroelementos cambiables (meq/100g)meq/100g					
Ap (0-24)	7,51	7,08	18,63	1,32	32,71	27,74	2,42	0,74	1,81	100
Bw ₁ (24-64)	7,30	7,06	21,30	1,21	31,60	28,32	2,68	0,62	1,22	100
Bw _{2k} (64-140)	7,59	7,23	25,50	0,82	29,30	22,15	4,93	1,83	0,56	100
Ck (140→)	7,60	7,20	27,96	0,03	53,87	23,15	4,82	2,93	0,42	58,13

HORIZONTES. PROFUNDIDAD (cm)	%N	P (ppm)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe	Mn	Cu	Zn
			Macroelementos asimilables (meq/100g)						ppm	
Ap (0-24)	0,08	0,020	64,44	4,73	1,26	2,71	0,0136	0,0146	0,0021	0,0110
Bw ₁ (24-64)	0,07	0,010	42,63	5,13	1,59	1,71	0,0145	0,0122	0,0020	0,0114
Bw _{2k} (64-140)	0,05	0,008	58,20	10,25	2,40	0,98	0,0141	0,0106	0,0019	0,0156
Ck (140→)	0,01	0,002	35,15	6,17	6,10	0,62	0,0058	0,0100	0,0020	0,0132

Tabla III.5. Resultados del análisis de la muestras de suelo en mínimo laboreo.

PERFIL DE LABOREO CONVENCIONAL (LC)

HORIZONTES. PROFUNDIDAD (cm)	Textura (%)					Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	pF	
	Arena Gruesa 2-0,05 mm	Arena Fina 0,05-0,2	Limo Grueso 0,05-0,02 mm	Limo Fino 0,02- 0,002 mm	Arcilla <0,002 mm			1/3 atm	15 atm
Ap (0-24)	2,78	2,90	5,98	12,27	76,07	95,6	1,27	57,6	45,4
Bw ₁ (24-64)	1,15	1,25	6,20	16,17	75,23	160,2	1,29	57,5	45,1
Bw ₂ k (64-140)	-	0,70	5,85	15,30	78,15	138,1	1,32	58,7	46,8
Ck (140→)	-	0,06	5,15	16,41	78,38	257,3	1,37	58,8	46,9

HORIZONTES. PROFUNDIDAD (cm)	pH (agua)	pH (KCl)	% CO ₃ ⁼	% M.O.	T	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	%V
					Macroelementos cambiables (meq/100g)meq/100g					
Ap (0-24)	7,25	7,14	23,96	1,69	34,48	23,32	1,81	0,98	1,10	79,03
Bw ₁ (24-64)	7,30	7,00	22,00	1,38	31,58	27,17	2,36	0,90	1,15	100
Bw ₂ k (64-140)	7,58	7,15	26,30	0,80	30,16	23,66	4,40	1,10	1,00	100
Ck (140→)	7,66	7,20	32,15	-	53,87	25,36	4,61	2,89	0,49	61,90

HORIZONTES. PROFUNDIDAD (cm)	%N	P (ppm)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe	Mn	Cu	Zn
			Macroelementos asimilables (meq/100g)				ppm			
Ap (0-24)	0,09	0,015	26,97	5,18	1,23	3,27	0,0129	0,0066	0,0026	0,0117
Bw ₁ (24-64)	0,07	0,015	65,20	5,42	1,51	1,58	0,0135	0,0120	0,0020	0,0101
Bw ₂ k (64-140)	0,05	0,010	19,00	11,10	1,89	0,92	0,0136	0,0098	0,0019	0,0132
Ck (140→)	-	0,010	30,60	4,80	2,21	0,87	0,0072	0,0101	0,0020	0,0141

Tabla III.6. Resultados del análisis de la muestras de suelo en laboreo convencional.

III.1.3. Arcillas.

En los tres perfiles completos se ha determinado la mineralogía de la fracción arcilla mediante difracción de rayos X. Los resultados obtenidos se encuentran recogidos en la tabla III.7. Los datos corresponden a un análisis semicuantitativo que se ha realizado a partir de los poderes reflectantes recopilados por Galán y Espinosa (1974) y Montealegre (1976) (Tabla II.1 de la página 44).

Todas las muestras tienen una composición cualitativa similar, de manera que para cada horizonte se identifican los mismos picos en los difractogramas pertenecientes a los mismos tratamientos.

A partir del difractograma obtenido para la muestra en polvo (gráf. VII.1, gráf. VII.6 y gráf. VII.11 de los Anexos IV, V y VI) se identifica la presencia de caolinita, illita-mica, cuarzo, calcita y trazas de clorita, además, se advierte la existencia de un hombro que no llega a definirse como pico en la parte izquierda del difractograma (entre 3 y 9°).

En el difractograma de la muestra saturada en potasio (gráf. VII.2, gráf. VII.7 y gráf. VII.12 de los Anexos IV, V y VI) se produce la definición de un pico dentro del hombro mencionado anteriormente, concretamente a los 8... , perteneciente a la mica. Este pico de la mica correspondiente a un espaciado basal $d = 10,048$ se aprecia con mayor claridad en el resto de difractogramas, pertenecientes a los tratamientos de saturación en potasio y calentamiento a 550°C (gráf. VII.3, gráf. VII.8 y gráf. VII.13 de los Anexos IV, V y VI), saturación en magnesio (gráf. VII.4, gráf. VII.9 y gráf. VII.14 de los Anexos IV, V y VI) y saturación en magnesio y etilenglicol (gráf. VII.5, gráf. VII.10 y gráf. VII.15 de los Anexos IV, V y VI).

En estos difractogramas también se aprecia un pico perteneciente al espaciado basal $d=14,052$. Aunque debido a la anchura del mismo y a la poca definición que posee no permite discriminar si pertenece a esmectita o vermiculita, por lo que el cálculo de las mismas se realiza de forma conjunta.

MUESTRA		Esmectitas %	Mica %	Caolinita %	Ilita %	Cuarzo %	Calcita %
Perfil	Horizonte						
SD	Ap	80	1	3	3	6	7
SD	Bw ₁	85	1	3	2	4	5
SD	Bw _{2k}	92	1	2	1	2	2
SD	Ck	81	1	3	2	7	6
ML	Ap	86	1	3	2	7	1
ML	Bw ₁	85	1	3	2	4	5
ML	Bw _{2k}	92	1	2	1	2	2
ML	Ck	81	1	3	2	7	6
LC	Ap	88	1	1	2	4	4
LC	Bw ₁	85	1	3	2	4	5
LC	Bw _{2k}	92	1	2	1	2	2
LC	Ck	81	1	3	2	7	6

Tabla III.7. Mineralogía de la fracción arcilla de los diferentes horizontes de los tres perfiles.

III.2. Resultados de la experimentación.

La saturación de las muestras fue condición indispensable para la extracción de solución del suelo, debido a las dificultades propias de este tipo de suelo con tan alto contenido en arcillas. De manera que en todo el tiempo de experimentación las muestras inalteradas de suelo permanecieron saturadas.

El punto de saturación de estos suelos se comprobó tanto en experiencias en campo como en las columnas de muestra inalterada mediante riego (Imagen III.4).

Para la medida en campo se fueron simulando diferentes episodios de lluvia con un mini-simulador tipo LUW (Imagen III.5). En cada parcela, primero se medía, con el TDR, la humedad volumétrica inicial, después se repetían episodios de lluvia. La lluvia simulada consistía en 3 L de agua que caían en unos 18 minutos cada uno, obteniendo una intensidad de lluvia de 192 mm/h. Antes y después de los mismos se medía la humedad volumétrica del suelo. La saturación se obtenía cuando existía escorrentía superficial. En este instante se medía la humedad volumétrica, este valor corresponde al valor de humedad de saturación.

Gracias a estas simulaciones y posteriores medidas se determinó que la saturación en estos suelos oscila entre el 49 y 50% en las tres parcelas. García et al. (2005) determinaron, en campo, la variación espacio temporal del agua en estos mismos suelos de la Finca Experimental Tomejil a partir de sondas FDR tipo Enviroscan. Los resultados demostraron que bajo condiciones naturales la siembra directa tiende a acumular más agua, especialmente en los primeros centímetros, agotándose más lentamente y apareciendo una distribución más uniforme a lo largo del perfil. Sin embargo el punto de saturación bajo condiciones de humedad simulada es el mismo, ya que la lluvia es forzada.



Imagen III.4. Muestra inalterada regada hasta humedad de saturación.



Imagen III.5. Minisimulador tipo LUW.

Una vez conocido el punto de saturación de estos suelos se procedió a la instalación de las sondas extractoras.

III.3. Resultados del análisis estadístico de la solución del suelo.

En este apartado se incluyen los resultados obtenidos del análisis de la solución del suelo, tal y como se especifica en el apartado de Material y Métodos.

Para ello estos resultados se han dividido en cationes monovalentes, cationes divalentes y aniones por las semejanzas químicas que presentan. Cada elemento ha sido considerado como una variable y su estudio estadístico se compone de tres partes:

- En primer lugar se ha representado la concentración en cada una de las extracciones, esto es, la secuencia de valores observados a lo largo del tiempo para cada técnica de laboreo y profundidad. Con esto se pretende tener una visualización gráfica de los datos.
- En segundo lugar se ha realizado el Análisis de las Series Temporales para comprobar la existencia de algún tipo de tendencia en los datos, mediante el suavizado mediante medias móviles a 5 términos, así como la predicción de valores futuros.
- En tercer lugar se realiza el análisis de la varianza (ANOVA). Debido a que, según se demuestra en el apartado anterior de Análisis de las Series Temporales, las variables estudiadas muestran una ausencia de tendencia, esto es, las variables poseen un comportamiento aleatorio que puede asimilarse a una variable normal. Por tanto, se puede realizar el análisis de la varianza. El objetivo de este capítulo es poder determinar la influencia sobre las variables de la técnica de laboreo y de la profundidad de extracción de solución del suelo.

Para comprobar el carácter de normalidad los índices y estadísticos utilizados son Simetría estándar, Kurtosis estándar, Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov y los valores obtenidos para las variables en estudio son los que se indican en la tabla III.8.

Variable	Simetría estándar	Kurtosis estándar	Shapiro-Wilk	Kolmogorov-Smirnov
Na ⁺	2,39062	-1,17408	No	No
K ⁺	1,89847	-2,08060	No	No
Ca ⁺⁺	0,71411	1,63443	Sí	Sí
Mg ⁺⁺	1,59036	0,04680	Sí	Sí
HCO ₃ ²⁻	-0,09425	0,91817	Sí	Sí
SO ₄ ²⁻	5,39410	3,49619	No	No
Cl ⁻	0,37014	-0,87713	Sí	Sí

Tabla III.8. Valores obtenidos para cada variable de los diferentes índices y estadísticos.

Para aceptar la hipótesis de normalidad los índices de simetría y Kurtosis deben situarse entre -2 y 2. El resto de los tests se han realizado al 95% de confianza y

todos ellos miden el grado de proximidad entre la variable en cuestión y una variable normal. Se observa que todas las variables excepto, Na^+ , K^+ y SO_4^{2-} dan positivo en algunos de los test habituales de normalidad y que incluso Na^+ y K^+ ofrece datos de simetría y Kurtosis similares a los admisibles para una variable normal.

Puede en cualquier caso comprobarse que aquellas variables para las que se obtienen peores índices de normalidad revelan, en sus gráficas como series temporales, una tendencia de crecimiento o decrecimiento más acusada (gráf. III.9 al III.14, del III.34 al III.39 y del III.125 al III.130).

Finalmente se realiza el análisis de la varianza (ANOVA) sobre las variables. Estudiando el comportamiento de la variable dependiente (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , SO_4^{2-} , HCO_3^{2-} y Cl^-) con respecto a la técnica de laboreo y la profundidad de extracción de la muestra. Se trata de comprobar si el valor medio de las variables depende de la técnica de laboreo aplicada o de la profundidad.

En cada caso se aplican dos tipos de análisis: el F-test que requiere normalidad de variables y el test de Kruskal-Wallis que es un test no paramétrico y no precisa por tanto de esta normalidad, ambos a un nivel de confianza del 95%. Para las variables, Na^+ , K^+ y SO_4^{2-} , se ha realizado solamente el test de Kruskal-Wallis debido a que estas variables no pueden considerarse normales. En todos los casos se ha comprobado también la hipótesis de igualdad de varianzas, que ofrece datos aceptables para aplicar estos tests. Cuando las medias ofrecen diferencias estadísticamente significativas de un nivel a otro se acompaña además una tabla de homogeneidad de grupos en la que puede apreciar qué medias son significativamente diferentes y cuales pueden considerarse homogéneas (es decir, las medias correspondientes a esos grupo no pueden considerarse estadísticamente diferentes al nivel de confianza aceptado). Asimismo, en tales casos se incorpora un gráfico de medias y de intervalos LSD (least significant difference) al 95%. Los intervalos que se muestran en dicho gráfico están basados en el procedimiento de menor diferencia significativa (LSD least significant difference), de Fisher en virtud del cual, si los intervalos de dos medias se solapan en un 95%, esas medias pueden ser consideradas iguales.

III.3.1. Cationes monovalentes.

Los cationes monovalentes que se han estudiado han sido sodio y potasio. Cada uno de ellos se analiza de forma individual, según la técnica de laboreo y el horizonte de extracción, tal y como se especifica en el capítulo de Material y Métodos.

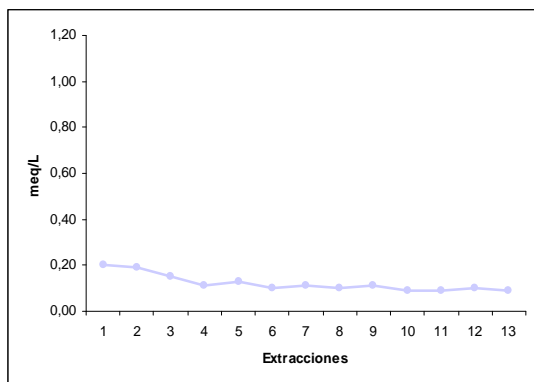
III.3.1.1. *Sodio.*

a) *Evolución de la concentración de sodio en la solución del suelo.*

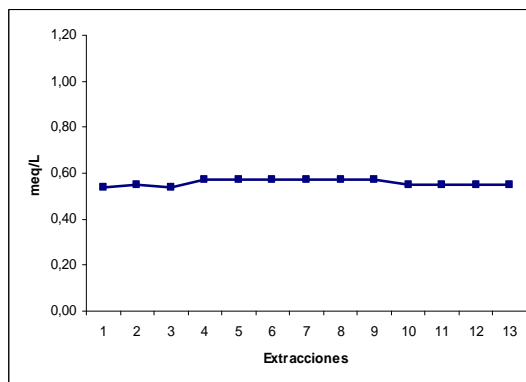
➤ *Siembra Directa:* En el horizonte superficial la concentración de sodio disminuye desde 0,2 hasta 0,11 meq/L, a partir de aquí mantiene un valor constante de 0,10 meq/L (gráf. III.1).

En el horizonte subsuperficial, el contenido en sodio va aumentando desde 0,54 hasta 0,57 meq/L, este último valor se mantiene hasta la novena extracción donde desciende hasta 0,55 meq/L y a partir de ella se mantiene constante (gráf. III.2).

En la comparación de las gráficas III.1 y III.2 se observa como en el perfil de siembra directa la solución del suelo subsuperficial es más rica en sodio que la superficial. En las cuatro primeras extracciones, mientras que la solución del suelo subsuperficial se enriquece en sodio, la superficial sufre un empobrecimiento, después ambas mantienen los valores alcanzados hasta el final de la experiencia.



Gráf. III.1. Evolución de la concentración de *sodio* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *siembra directa*.

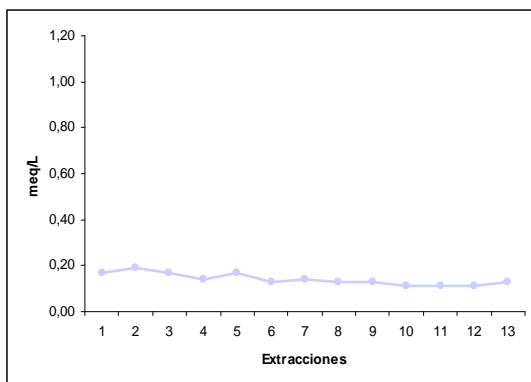


Gráf. III.2. Evolución de la concentración de *sodio* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *siembra directa*.

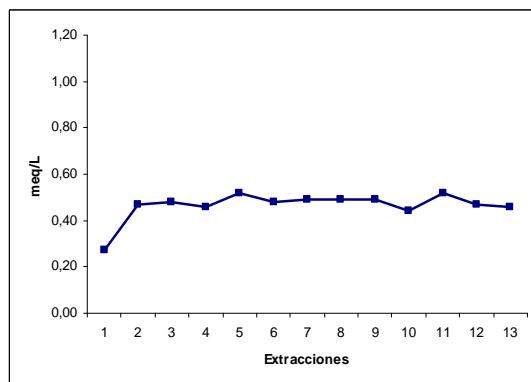
➤ *Mínimo Laboreo:* En el horizonte superficial la concentración de sodio desciende a lo largo del tiempo de estudio, siendo el valor inicial, de 0,17 meq/L, y el final, 0,13 meq/L (gráf. III.3).

Mientras que en el horizonte subsuperficial, experimenta un primer ascenso en la segunda extracción en la que pasa de 0,27 a 0,47 meq/L para después mantener constante su contenido en torno a 0,49 meq/L, excepto en las extracciones quinta y décimo primera en las que el contenido llega hasta 0,52 meq/L (gráf. III.4).

Por tanto, el contenido en sodio de la solución del suelo es, en todas las extracciones, mayor en profundidad que en superficie. A lo largo del tiempo la solución del suelo del horizonte subsuperficial se enriquece en sodio ligeramente. En superficie ocurre lo contrario, aunque la diferencia entre el valor inicial y final es menor (gráf. III.3 y III.4).

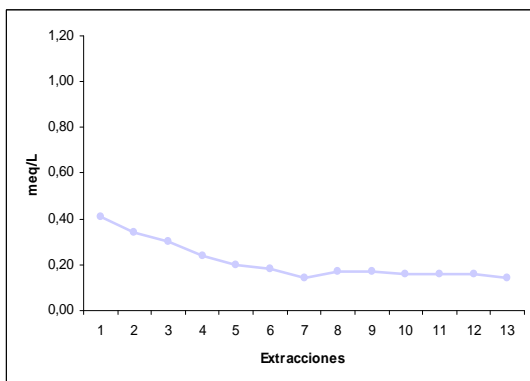


Gráf. III.3. Evolución de la concentración de *sodio* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *mínimo laboreo*.

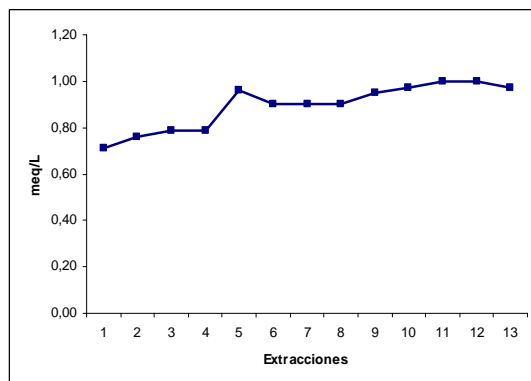


Gráf. III.4. Evolución de la concentración de *sodio* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *mínimo laboreo*.

➤ *Laboreo Convencional*: La liberación del sodio del suelo a la solución del suelo en el horizonte superficial desciende (ver gráf. III.5), desde el valor inicial de 0,41 meq/L hasta la mitad de la experiencia donde alcanza un valor constante de 0,16 meq/L.



Gráf. III.5. Evolución de la concentración de *sodio* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *laboreo convencional*.

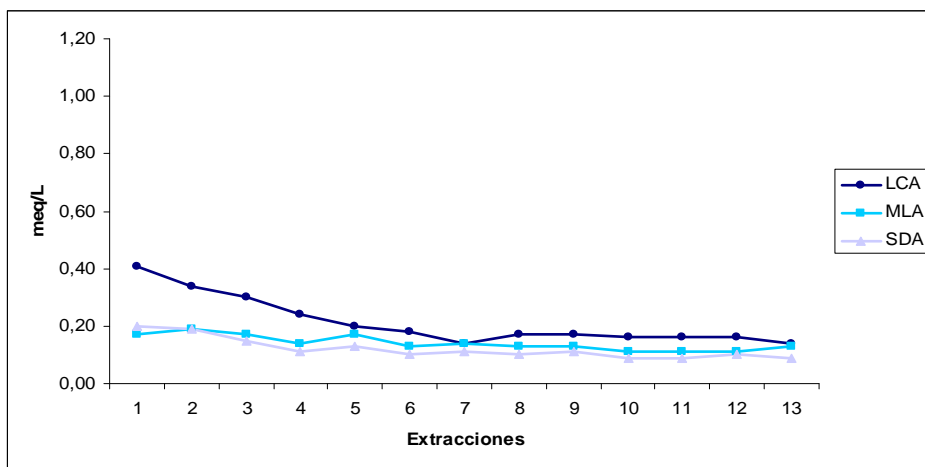


Gráf. III.6. Evolución de la concentración de *sodio* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *laboreo convencional*.

Sin embargo, en el horizonte subsuperficial, y según se representa en el gráfico III.6, la liberación de sodio aumenta a lo largo de toda la experiencia, en la primera extracción es de 0,71 meq/L, mientras que en la décimo primera y décimo segunda el valor es 1 meq/L, aunque en la última baja a 0,97 meq/L.

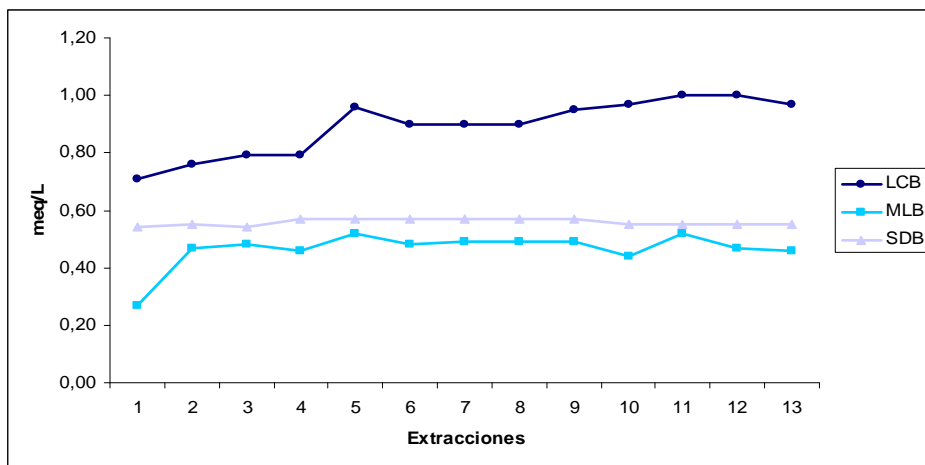
De manera que desde el inicio de la experiencia la solución del suelo del horizonte subsuperficial contiene más sodio que la del horizonte superficial. Además la solución del horizonte subsuperficial se va enriqueciendo en sodio mientras en superficie ocurre lo contrario (gráf. III.5 y III.6).

➤ *Comparativa en el horizonte superficial:* Tal y como muestra el gráfico III.7 en los tres sistemas la concentración de sodio en la solución superficial descende. Es en laboreo convencional, seguida de la de mínimo laboreo, en la que, en cada extracción, el suelo pone mayor cantidad de sodio a disposición de las plantas, siendo la parcela de siembra directa la de valores menores de sodio en cada extracción. Si bien las líneas de mínimo laboreo y siembra directa son similares a lo largo de todo el estudio.



Graf. III.7. Comparativa de evolución de la concentración de sodio en los tres horizontes superficiales.

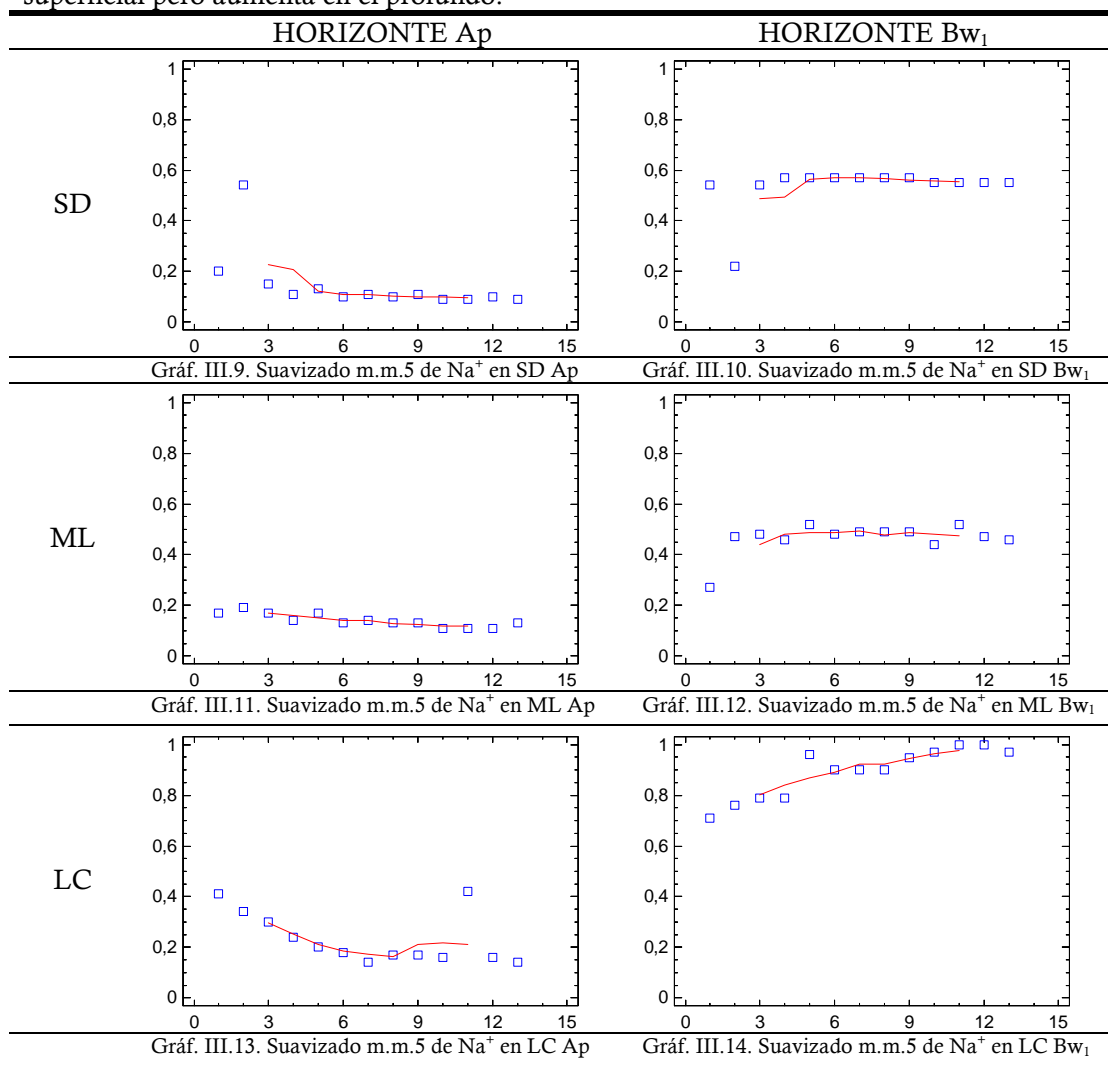
➤ *Comparativa en el horizonte subsuperficial:* En el caso de la solución del horizonte subsuperficial en los tres casos el contenido en sodio aumenta a lo largo del tiempo de estudio (gráf. III.8), si bien, ese aumento es más acusado en laboreo convencional. Es además, aquí donde hay siempre mayor contenido de sodio, existiendo bastante diferencia con las otras que poseen valores más similares entre ellas, siendo siempre el contenido en sodio en siembra directa mayor que en mínimo laboreo.



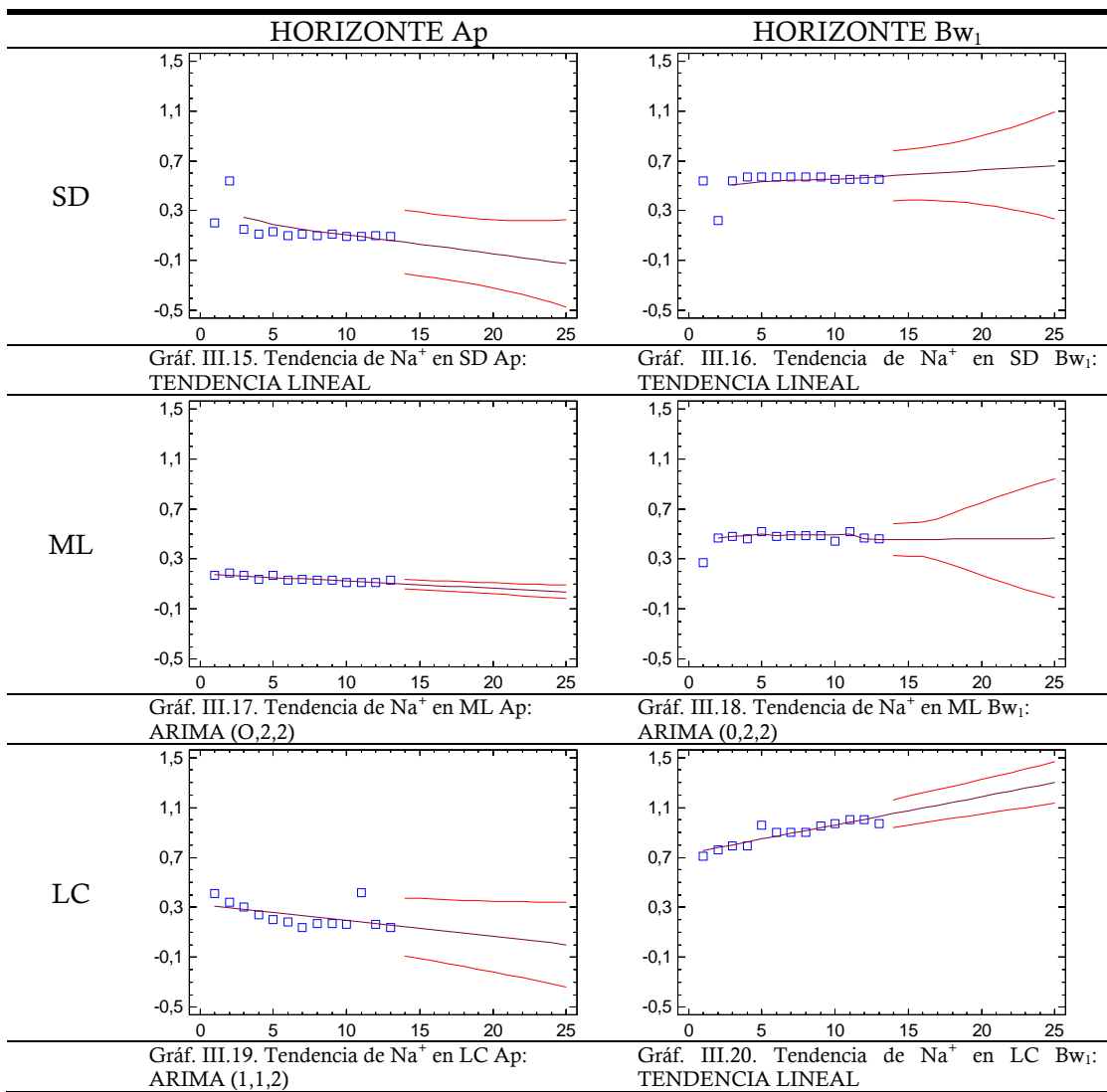
Graf. III.8. Comparativa de evolución de la concentración de sodio en los tres horizontes subsuperficiales.

b) *Análisis de Series Temporales.*

Se ha aplicado el suavizado mediante medias móviles a 5 términos (m.m.5) con el objetivo de obtener, al menos, un análisis visual de la tendencia. De este análisis se desprende que en las parcelas de siembra directa (gráf. III.9 y III.10) y mínimo laboreo (gráf. III.11 y III.12) no está tan clara la tendencia que se dejaba apreciar en el apartado anterior. En estos casos tras el suavizado se ve claramente como la tendencia es a mantener una concentración constante, ligeramente ascendente en los horizontes subsuperficiales y ligeramente ascendente en los horizontes superficiales. Mientras que, de forma clara, en laboreo convencional (gráf. III. 13 y III.14) el sodio disminuye con el tiempo en el horizonte superficial pero aumenta en el profundo.



Posteriormente se hace un pronóstico de la tendencia, empleando en cada caso el modelo que ofrece mejores resultados de acuerdo con el criterio de Akaike. Aunque los pronósticos se hacen a partir del modelo que mejor se ajusta a la serie de datos, se comprueba como únicamente en el caso de ML (Ap) (gráf. III.17) y LC (Bw₁) (gráf. III.20) el modelo se ajusta, debido a que en la predicción, las líneas rojas delimitan un intervalo de posibles valores muy estrecho. En el resto de los casos las predicciones no son fiables (gráf. III.15, III.16, III.18 y III.19).



Se incluyen además las fórmulas de las rectas de regresión para los 6 casos de la variable Na^+ (tabla III.9):

	A	B
ML	$0,181154 - 0,005769 t$	$0,418846 + 0,006538 t$
SD	$0,418846 + 0,006538 t$	$0,467308 + 0,009286 t$
LC	$0,323462 - 0,012912 t$	$0,733846 + 0,022637 t$

Tabla III.9. Fórmulas de las rectas de regresión de la variable sodio para los 6 casos.

c) ANOVA.

Como se ha dicho anteriormente se estudia el sodio como variable dependiente de la técnica de cultivo y de la profundidad de extracción de la solución del suelo.

Tras realizar el test de Kruskal-Wallis se obtiene que existe diferencia significativa de los valores medios, al 95% de confianza, para cada uno de los dos factores, técnica de laboreo y profundidad. Esto es, que la concentración de sodio en la solución del suelo está en función de la profundidad de extracción de la muestra, así como de la técnica de laboreo que se esté empleando.

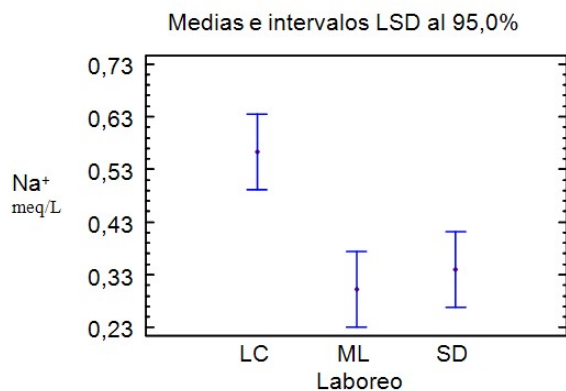
Se comprueba que la solución de laboreo convencional es más rica en sodio que las de siembra directa y mínimo laboreo. Thomas et al. (2007) comprobó también este efecto de la técnica de cultivo sobre el sodio de cambio, en su caso, para los 10 cm superficiales de un Luvisol en Australia. También Loch y Coughlan (1984) encontraron este efecto de la técnica de cultivo sobre el sodio de cambio en los 4 cm superficiales en un Vertisol del sur de Queensland, cuando comparaban el laboreo convencional con la siembra directa. Dalal (1989) observó menor porcentaje de sodio de cambio bajo siembra directa que bajo laboreo convencional en el mismo Vertisol.

En la tabla III.10 se recogen las medias de la variable correspondientes a cada técnica de laboreo junto con un análisis de homogeneidad por grupos. En ella se aprecia como la concentración de sodio en la solución del suelo de las parcelas de mínimo laboreo y siembra directa se comporta como un grupo homogéneo, mientras que el comportamiento en laboreo convencional es diferente, siendo el contenido en sodio mayor que en siembra directa y mínimo laboreo. Las medias para SD y ML pueden considerarse iguales existiendo diferencia estadísticamente significativa al 95% entre los niveles LC-ML y LC-SD.

Laboreo	Medidas	Media	Grupos homogéneos
ML	26	0,303	X
SD	26	0,340	X
LC	26	0,563	X

Tabla III.10. Valores medios de la variable sodio para las diferentes técnicas de cultivo y su comportamiento según grupos homogéneos.

En el gráfico III.21 se explica de forma más evidente la existencia de dos grupos homogéneos en cuanto a comportamiento según la técnica de laboreo.

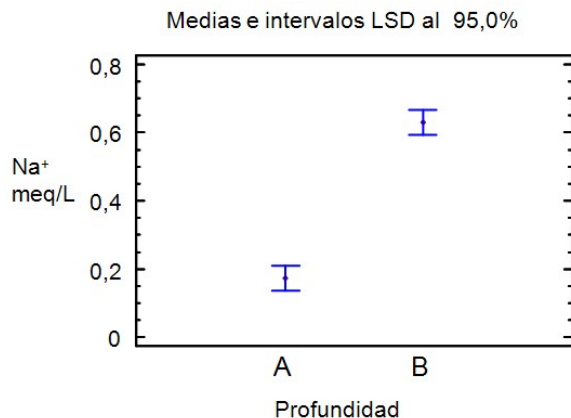


Gráf. III.21. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el Na⁺ en las tres técnicas de cultivo.

Por su parte, la profundidad muestra medias significativamente diferentes para los dos horizontes en los que se realiza la toma de muestras (tabla III.11 y gráf. III.22). La solución del horizonte subsuperficial es más rica en sodio que la del horizonte superficial. Franzluebbbers et al. (1996) también encontraron que el sodio de cambio aumentaba con la profundidad en las dos técnicas que estudiaron (siembra directa y laboreo convencional) en un Fluventic Ustochrept en Texas.

Profundidad	Medidas	Media	Grupos homogéneos
A	39	0,174	X
B	39	0,630	X

Tabla III.11. Valores medios de la variable sodio para las diferentes profundidades de extracción y su comportamiento según grupos homogéneos.



Gráf. III.22. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el Na⁺ en las dos profundidades de muestreo.

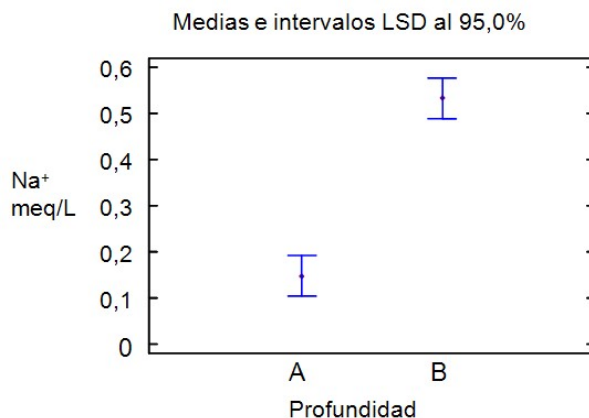
A continuación se analiza si efectivamente la variable sodio es dependiente del factor profundidad en todas y cada una de las técnicas de cultivo.

➤ *ANOVA para Na⁺-SD y el factor de profundidad.*

En siembra directa, el test de Kruskal-Wallis confirma la dependencia de los resultados de concentración de sodio en la parcela de siembra directa con respecto a la profundidad de toma de muestra. Las medias y el análisis de homogeneidad de grupos vienen recogidos en la tabla III.12 y el gráfico para las medias e intervalos LSD es el III.23.

Profundidad	Medidas	Media	Grupos homogéneos
A	13	0,148	X
B	13	0,532	X

Tabla III.12. Valores medios de la variable sodio para las diferentes profundidades de extracción en la parcela de siembra directa y su comportamiento según grupos homogéneos.



Gráf. III.23. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el Na⁺-SD en las dos profundidades de muestreo.

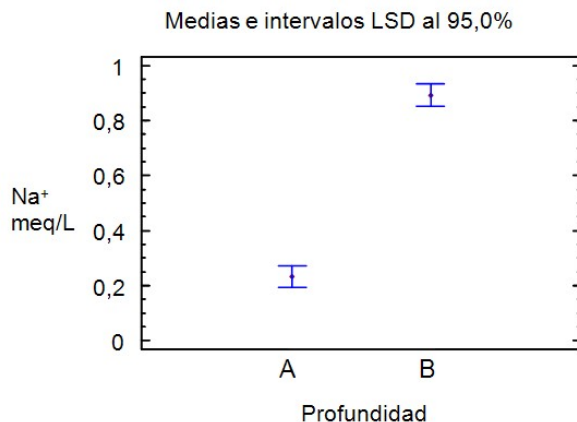
➤ *ANOVA para Na⁺-ML y el factor de profundidad.*

El test de Kruskal-Wallis confirma también, en este segundo caso, la dependencia de los resultados de concentración de sodio en mínimo laboreo con respecto a la profundidad de toma de muestra. Las medias y el análisis de homogeneidad de grupos están en la tabla III.13:

Profundidad	Medidas	Media	Grupos homogéneos
A	13	0,141	X
B	13	0,465	X

Tabla III.13. Valores medios de la variable sodio para las diferentes profundidades de extracción en la parcela de mínimo laboreo y su comportamiento según grupos homogéneos.

El gráfico para las medias e intervalos LSD es el III.24:



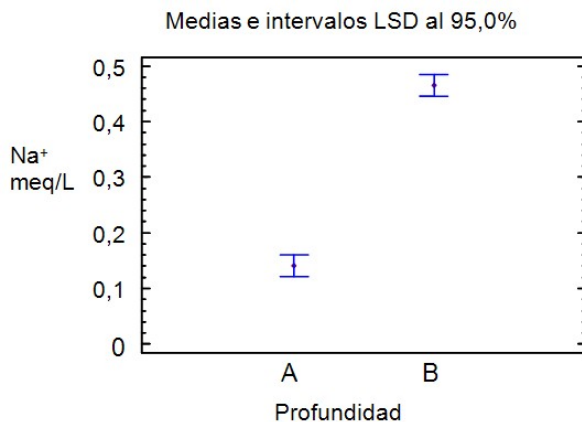
Gráf. III.24. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el Na⁺-ML en las dos profundidades de muestreo.

➤ ANOVA para Na⁺-LC y el factor de profundidad.

En el caso del laboreo convencional ocurre de la misma manera que en las dos anteriores. La concentración de sodio en la solución del suelo depende del horizonte en el que se muestree dicha solución. Las medias y el análisis de homogeneidad de grupos están en la tabla III.14 y en el gráfico III.25 se representan estos datos.

Profundidad	Medidas	Media	Grupos homogéneos
A	13	0,233	X
B	13	0,892	X

Tabla III.14: Valores medios de la variable sodio para las diferentes profundidades de extracción en la parcela de laboreo convencional y su comportamiento según grupos homogéneos.



Gráf. III.25. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el Na⁺-LC en las dos profundidades de muestreo.

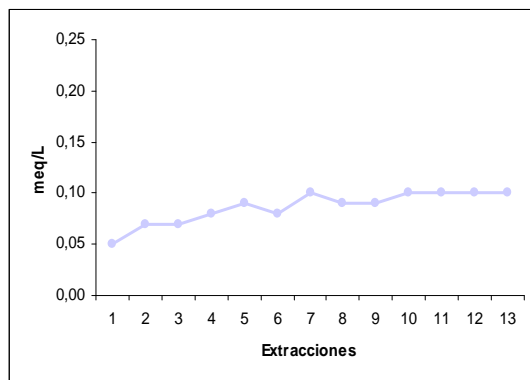
III.3.1.2. Potasio.

a) Evolución de la concentración de potasio en la solución del suelo.

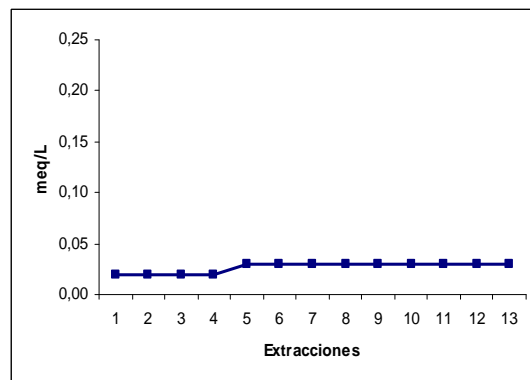
➤ *Siembra Directa:* Según se observa en el gráfico III.26, en superficie se produce un aumento progresivo, desde un valor de 0,05 meq/L en la primera experiencia, hasta 0,1 meq/L en la décima, permaneciendo la concentración constante a partir de esta medida.

En el horizonte subsuperficial el potasio permanece constante a lo largo de las cuatro primeras extracciones con una concentración de 0,02 meq/L, produciéndose en la quinta extracción un ascenso hasta un valor de 0,03 meq/L, éste permanecerá constante hasta el final (gráf. III.27).

Al establecer la comparación entre ambos horizontes (gráf. III.26 y III.27) se ve como el contenido de potasio en superficie es mayor que en profundidad. Además el enriquecimiento en superficie es paulatino y en profundidad se produce en una única extracción y en menor medida.



Gráf. III.26. Evolución de la concentración de *potasio* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *siembra directa*.



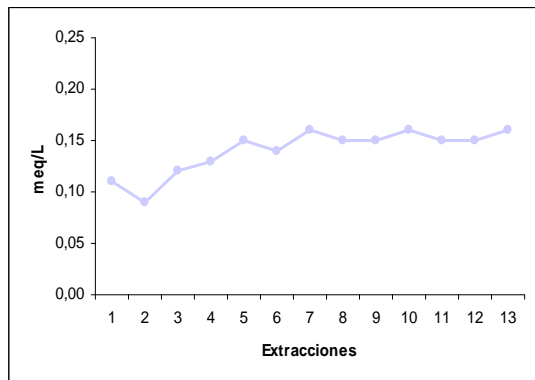
Gráf. III.27. Evolución de la concentración de *potasio* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *siembra directa*.

➤ *Mínimo Laboreo:* La liberación de potasio a la solución del suelo en el horizonte superficial se produce desde un valor inicial de 0,11 meq/L hasta 0,15 - 0,16 meq/L en la séptima extracción, a partir de ella el valor es constante (gráf. III.28).

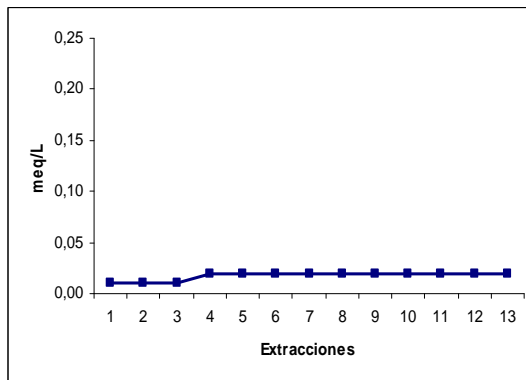
Por otra parte, en el horizonte subsuperficial permanece constante a lo largo de las tres primeras extracciones con 0,01 meq/L, produciéndose en la cuarta extracción un aumento hasta 0,02 meq/L, valor constante hasta el final (gráf. III.29).

De manera que a lo largo del estudio se produce un enriquecimiento de este elemento en la solución del suelo en superficie, en profundidad, la solución del suelo se enriquece en

menor medida. Los valores de potasio durante toda la experiencia son mayores en superficie que en profundidad, también es mayor el enriquecimiento (ver gráf. III.28 y III.29).



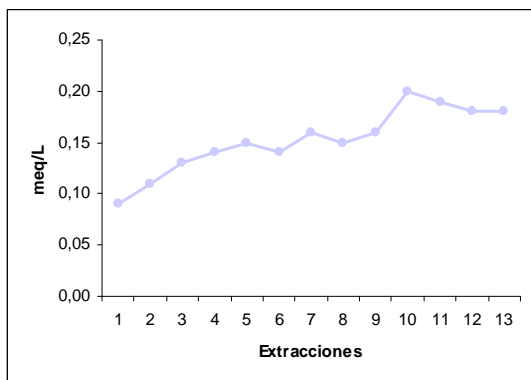
Gráf. III.28. Evolución de la concentración de *potasio* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *mínimo laboreo*.



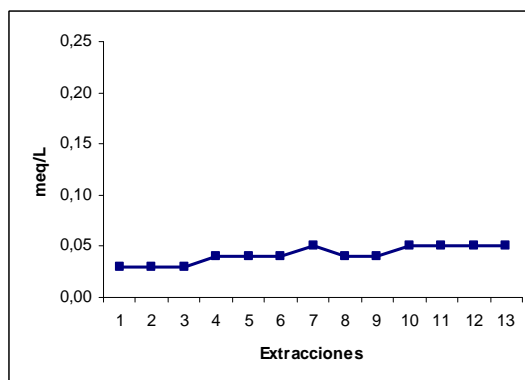
Gráf. III.29. Evolución de la concentración de *potasio* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *mínimo laboreo*.

➤ *Laboreo Convencional:* Como se ve en la gráfica III.30 a lo largo de la experiencia, en el horizonte superficial, la liberación de potasio del suelo a la solución del suelo aumenta desde 0,09 meq/L hasta 0,2 meq/L, que es la concentración máxima, a partir de ahí, desciende hasta 0,18 meq/L.

En el horizonte subsuperficial la liberación de potasio aumenta desde el principio (gráf. III.31), si bien, es mucho más leve en este caso. A partir de la extracción número diez permanece constante. Siendo la concentración inicial de potasio en la solución del suelo 0,03 meq/L y la final, 0,05 meq/L.



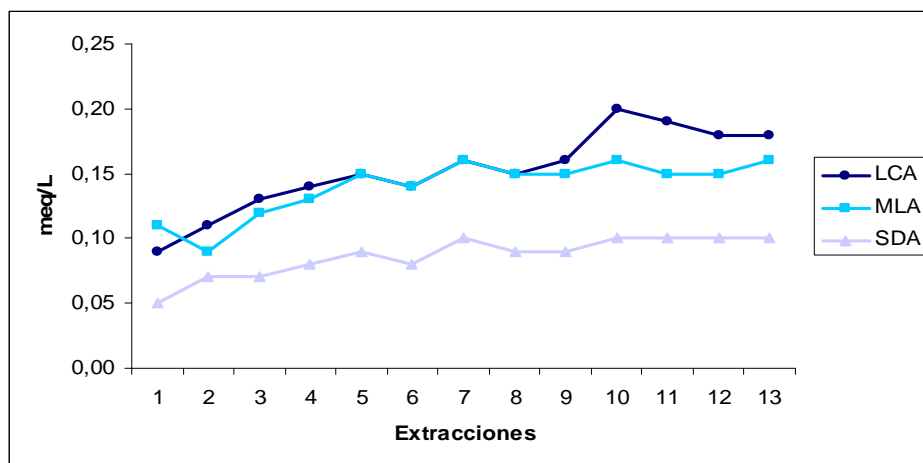
Gráf. III.30. Evolución de la concentración de *potasio* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *laboreo convencional*.



Gráf. III.31. Evolución de la concentración de *potasio* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *laboreo convencional*.

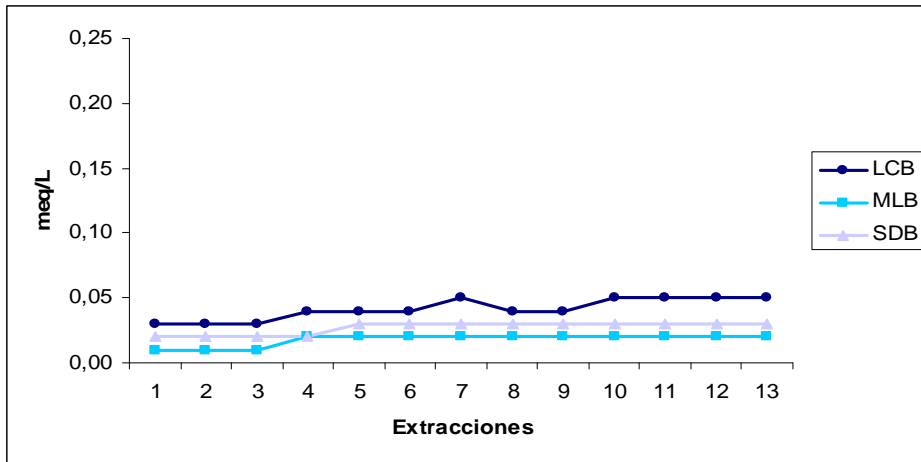
Por tanto, al comparar las gráficas III.30 y III.31 se comprueba que se produce un enriquecimiento de potasio en la solución del suelo tanto en superficie como en profundidad. Sin embargo, los valores de potasio iniciales y finales en la solución del suelo, así como el porcentaje de aumento son bastante diferentes, siendo, en superficie, mayores que en profundidad.

➤ *Comparativa en el horizonte superficial:* A partir de la gráfica III.32 se ve como en todos los casos las soluciones se van enriqueciendo a lo largo de la experiencia, pero se produce un desfase entre siembra directa, por un lado, y las otras dos técnicas por el otro. La de siembra directa es la que menos potasio pone a disposición de las raíces de las plantas. En las otras dos técnicas hasta la décima extracción los valores son muy similares, apareciendo las curvas casi superpuestas, si bien a partir de ahí en laboreo convencional el contenido es mayor.



Graf. III.32. Comparativa de evolución de la concentración de potasio en los tres horizontes superficiales.

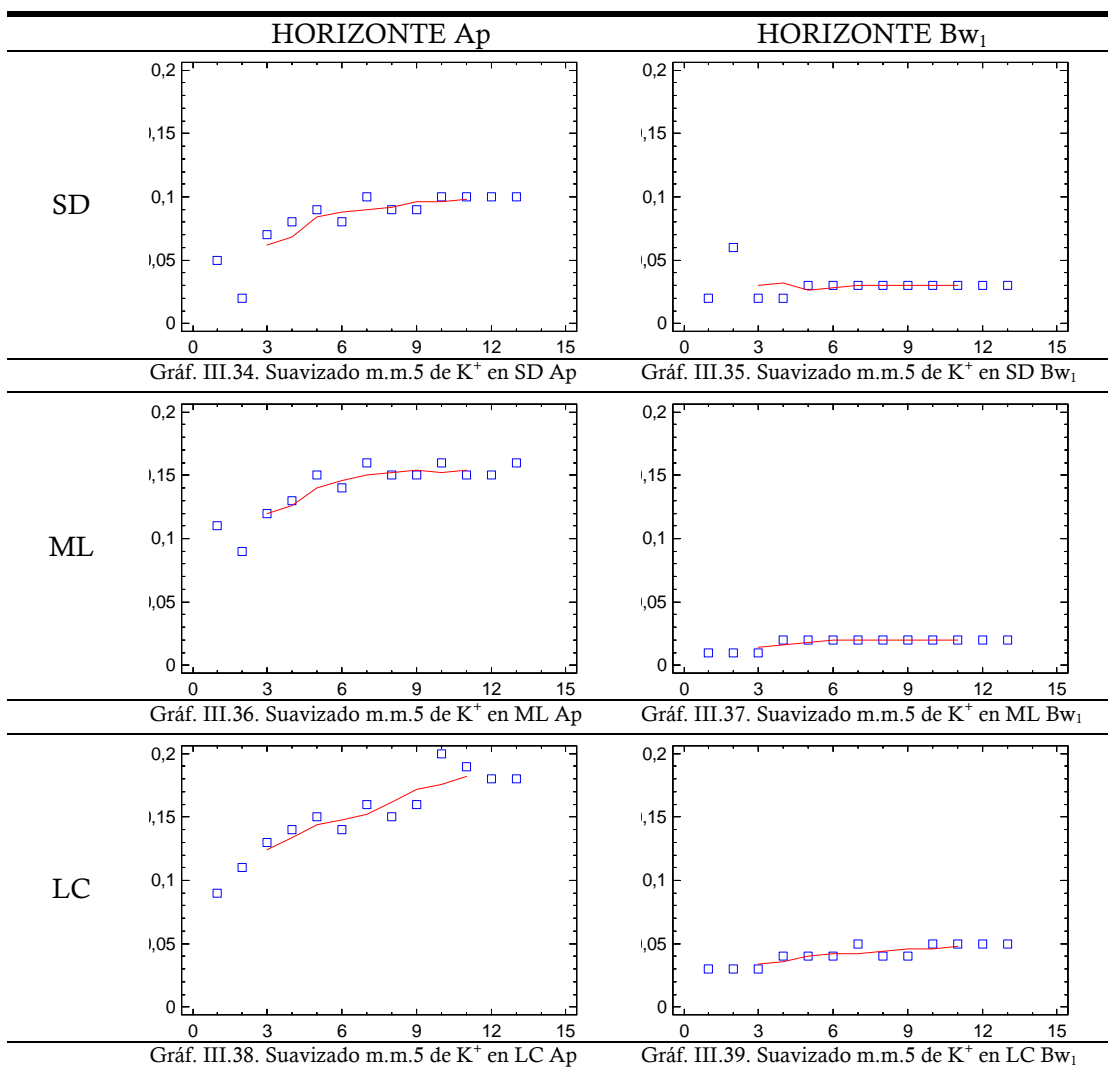
➤ *Comparativa en el horizonte subsuperficial:* la gráfica III.33 muestra que el comportamiento en los tres casos es el mismo: contenido constante en las primeras extracciones seguido de un aumento alrededor de la tercera o cuarta extracción y mantenimiento de este valor hasta el final. En profundidad la solución de mínimo laboreo es la más pobre en potasio, siendo la más rica la de laboreo convencional.



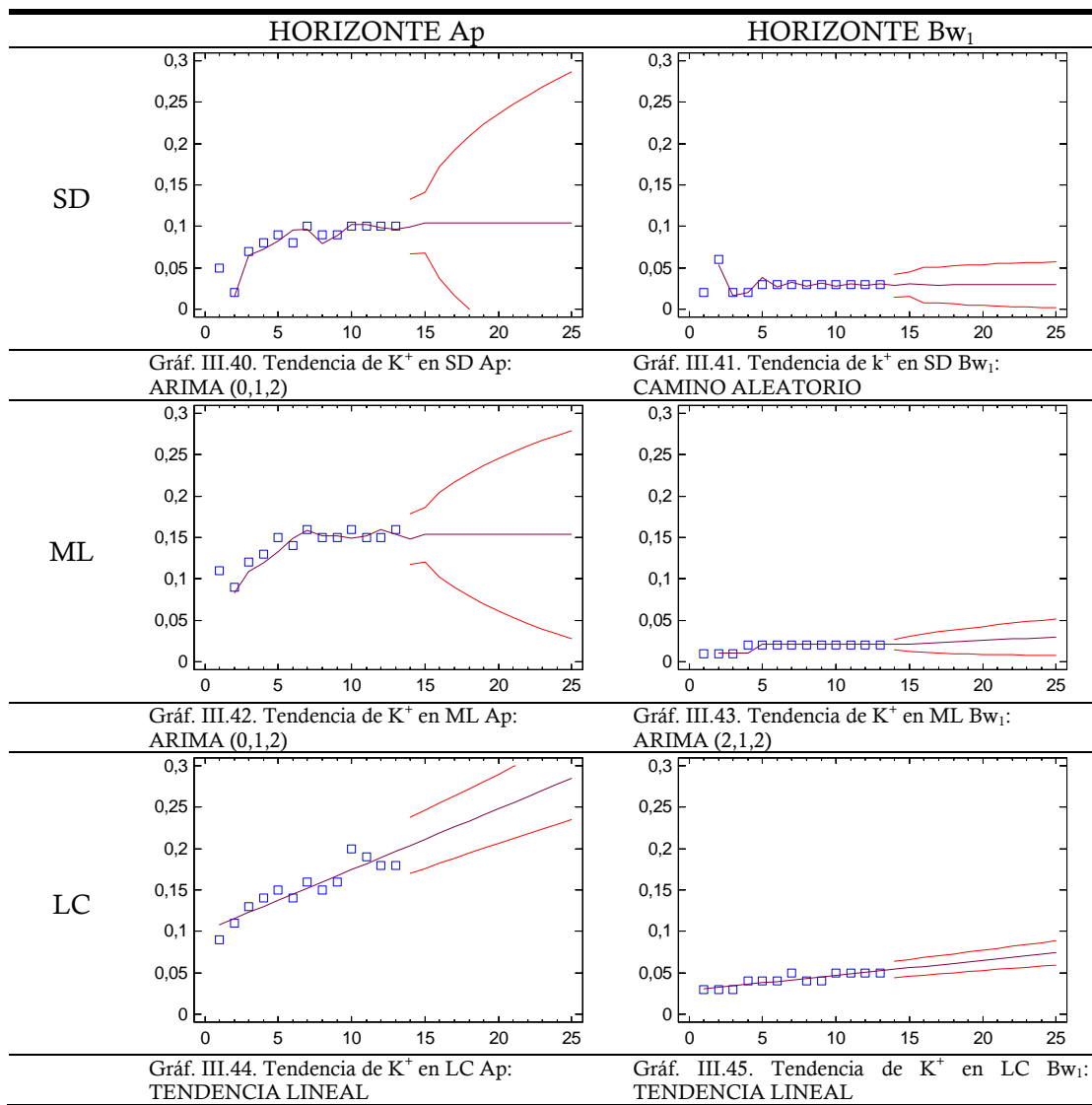
Graf. III.33. Comparativa de evolución de la concentración de potasio en los tres horizontes subsuperficiales.

b) *Análisis de Series Temporales.*

Los gráficos pertenecientes a la realización de las medias móviles a 5 términos son desde el III.34 hasta el III.39 y en todos ellos se aprecia una leve tendencia ascendente de las líneas pertenecientes a los horizontes superficiales de las tres parcelas, mientras que en profundidad la tendencia es a mantener la concentración constante.



Las predicciones para el caso del Potasio son las de los gráficos III.40 a III.45. Sólo en los horizontes subsuperficiales los límites de los valores predichos son suficientemente fiables como para aceptar dicha predicción.



Y las fórmulas de las rectas de regresión para los 6 casos de la variable K son las de la tabla III.15:

	A	B
ML	0,108462 + 0,004505 t	0,011923 + 0,000824 t
SD	0,048077 + 0,004890 t	0,030769 - 0,000110 t
LC	0,100769 + 0,007363 t	0,028846 + 0,001813 t

Tabla III.15. Fórmulas de las rectas de regresión de la variable potasio para los 6 casos.

c) ANOVA.

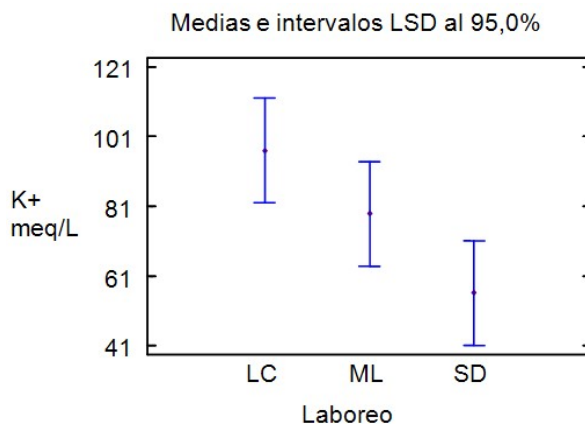
Al utilizar el test de Kruskal-Wallis para estudiar la dependencia de la variable potasio en relación con la técnica de laboreo y la profundidad de muestreo se obtiene que la variable es dependiente de los dos factores al 95% de confianza.

En la tabla III.16 aparecen las medias de la variable correspondientes a cada técnica de laboreo junto con un análisis de homogeneidad por grupos.

Laboreo	Medidas	Media	Grupos homogéneos
SD	26	0,056	X
ML	26	0,079	X X
LC	26	0,097	X

Tabla III.16. Valores medios de la variable potasio para las diferentes técnicas de cultivo y su comportamiento según grupos homogéneos.

Para el factor laboreo puede considerarse, por un lado, que las parcelas de siembra directa y mínimo laboreo se comportan de forma similar ya que las medias son homogéneas, existiendo diferencia estadísticamente significativa al 95% entre SD y LC. Y por otro lado, que mínimo laboreo y laboreo convencional se comportan también de forma similar. Estos resultados se explican porque los valores de potasio en mínimo laboreo se solapan por un extremo con los de siembra directa y por el otro con los de laboreo convencional. Esto se aprecia con mayor claridad en el gráfico siguiente (gráf. III.46).



Gráf. III.46. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el K⁺ en las tres técnicas de cultivo.

En la bibliografía existente, toda ella referente a evolución de nutrientes en el suelo (potasio de cambio en este caso) los resultados encontrados hacen referencia a mayor contenido de potasio cambiante cuando no existe manejo que cuando lo hay. Así lo comprueban Thomas et al. (2007) cuando estudian los efectos del manejo (comparando también laboreo convencional, mínimo laboreo y siembra directa), del rastrojo y de la fertilización en los nutrientes y la materia orgánica en los 30 cm superficiales de un Luvisol

de Australia afirman que el potasio de cambio es mayor en siembra directa que en laboreo convencional en los 10 cm superficiales del suelo, pero no hay influencia del rastrojo ni de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de potasio a esta profundidad. De la misma manera, Martín-Rueda et al. (2007) cuando comparan laboreo convencional, mínimo laboreo y siembra directa, junto con rotaciones de cultivo, en un Calciortidic Haploxeralf en España, comprueban que el potasio es mayor en siembra directa que en los otros sistemas en los 15 cm superficiales. De 15 a 30 cm siembra directa y mínimo laboreo tienen mayor contenido que laboreo convencional y a más profundidad los tres sistemas poseen iguales contenidos de potasio.

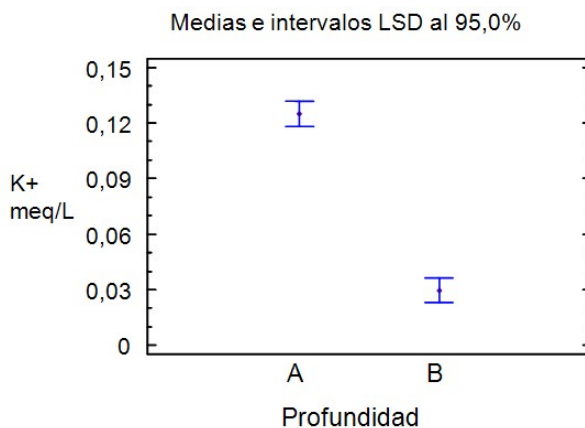
En el caso de comparar sólo laboreo convencional y siembra directa también toda la bibliografía encontrada demuestra mayor contenido de potasio en los sistemas de cultivo tradicional que en los de no cultivo, aunque estos resultados se dan sólo en el horizonte superficial, a mayor profundidad no encuentran grandes diferencias, este es el caso de Guzman et al. (2006), Franzluebbbers et al. (1996), DeMaría et al. (1999) y Hunter et al. (1989).

Por su parte, la profundidad también muestra medias significativamente diferentes para los dos niveles. Los valores medios de concentración para cada profundidad, así como el comportamiento según grupos homogéneos aparecen reflejados en la tabla III.17, y representados en el gráfico III.47.

En ambos se aprecia como la concentración de potasio es mayor en la solución del suelo que se extrae del horizonte superficial. En este caso el resultado si coincide con los de Thomas et al. (2007) en un Luvisol de Australia, Guzmán et al. (2006) en un suelo arcilloso de Manhattan y Asghar et al. (1996) en un Vertisol en Queensland. También Lal et al. (1990) e Ismail et al. (1994) encontraron que el potasio aumenta en superficie, aunque en este caso cuando las prácticas de manejo disminuían. Sin embargo Orihuela et al. (2001) no encontraron influencia de la profundidad en la cantidad de potasio cuando estudiaron la lixiviación de la forma soluble del potasio en un suelo de textura franca en Huelva (España).

Profundidad	Medidas	Media	Grupos homogéneos
A	39	0,125	X
B	39	0,030	X

Tabla III.17. Valores medios de la variable potasio para las diferentes profundidades de extracción y su comportamiento según grupos homogéneos.



Gráf. III.47. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el K⁺ en las dos profundidades de muestreo.

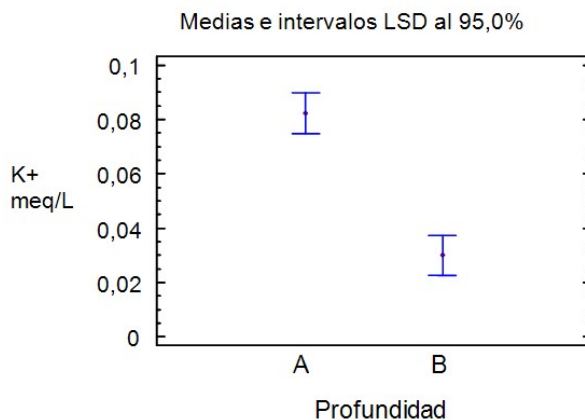
Seguidamente se analiza si, efectivamente, la variable potasio es dependiente del factor profundidad en todas y cada una de las técnicas de cultivo.

➤ ANOVA para K⁺-SD y el factor de profundidad.

En siembra directa el test estadístico de Kruskal-Wallis confirma que el potasio depende del horizonte muestreado. Las medias y el análisis de grupos homogéneos están en la tabla III.18 y en el gráfico III.48 se representan las medias e intervalos LSD.

Profundidad	Medidas	Media	Grupos homogéneos
A	13	0,082	X
B	13	0,030	X

Tabla III.18. Valores medios de la variable potasio para las diferentes profundidades de extracción en la parcela de siembra directa y su comportamiento según grupos homogéneos.



Gráf. III.48. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el K⁺-SD en las dos profundidades de muestreo.

➤ *ANOVA para K⁺-ML y el factor de profundidad.*

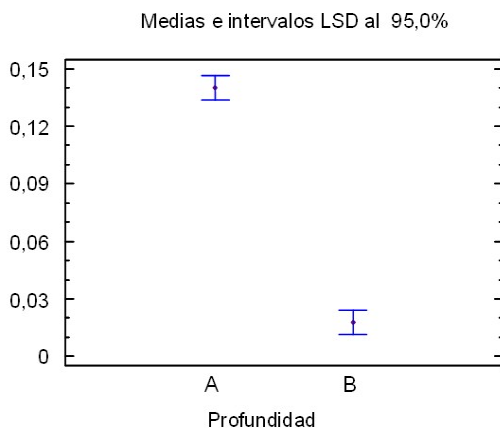
Al igual que en el caso anterior, el test estadístico de Kruskal-Wallis confirma que el potasio en mínimo laboreo también depende del horizonte muestreado.

Las medias y el análisis de homogeneidad de grupos vienen en la tabla III.19.

Profundidad	Medidas	Media	Grupos homogéneos
A	13	0,140	X
B	13	0,018	X

Tabla III.19. Valores medios de la variable potasio para las diferentes profundidades de extracción en la parcela de mínimo laboreo y su comportamiento según grupos homogéneos.

El gráfico para las medias e intervalos LSD es el III.49:



Gráf. III.49. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el K⁺-ML en las dos profundidades de muestreo.

➤ *ANOVA para K⁺-LC y el factor de profundidad.*

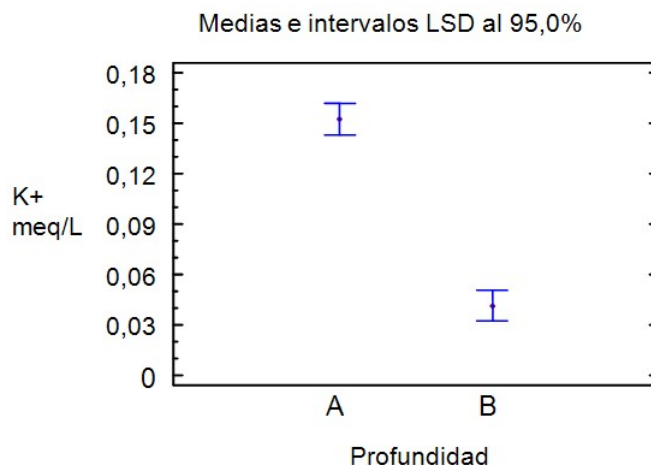
En la parcela de laboreo convencional, al igual que en las otras dos anteriores, el test de Kruskal-Wallis indica que existe dependencia del factor profundidad.

Las medias y el análisis de homogeneidad de grupos son los que aparecen en la tabla III.20.

Profundidad	Medidas	Media	Grupos homogéneos
A	13	0,152	X
B	13	0,042	X

Tabla III.20. Valores medios de la variable potasio para las diferentes profundidades de extracción en la parcela de laboreo convencional y su comportamiento según grupos homogéneos.

El gráfico III.50 muestra las medias e intervalos LSD.



Gráf. III.50. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el K^+ -LC en las dos profundidades de muestreo.

III.3.1.3. Comparativa de los cationes monovalentes.

El estudio de los cationes monovalentes indica que el laboreo convencional es la técnica que más cantidad de cationes monovalentes libera a la solución del suelo. En el caso del sodio, mínimo laboreo y siembra directa liberan el catión de la misma manera, mientras que para el potasio, el mínimo laboreo se encuentra en una situación intermedia entre las otras dos técnicas, siendo la siembra directa la que produce menor liberación de potasio.

En relación con la profundidad y considerando las tres técnicas de cultivo, mientras que el sodio aumenta con la misma, al potasio le ocurre lo contrario.

En superficie, la solución del suelo de laboreo convencional se empobrece en sodio a lo largo del período de estudio, mientras que las técnicas conservacionistas no muestran esta tendencia de forma tan clara. Por el contrario, cuando se trata del potasio, si se aprecia claramente un enriquecimiento en las tres técnicas.

En profundidad, a lo largo del período de estudio, la solución del suelo de laboreo convencional se enriquece en sodio, mientras que en mínimo laboreo y siembra directa no existe tendencia clara. En el caso del potasio, en las tres técnicas de cultivo la concentración del catión permanece constante a lo largo de todas las extracciones.

III.3.2. Cationes divalentes.

Los cationes divalentes estudiados han sido calcio y magnesio. Analizándose cada uno de ellos de forma individual.

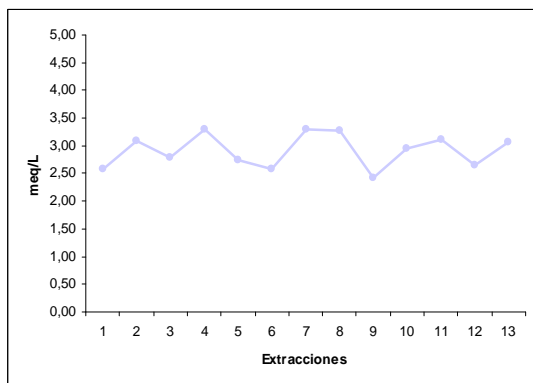
III.3.2.1. *Calcio.*

a) *Evolución de la concentración de calcio en la solución del suelo.*

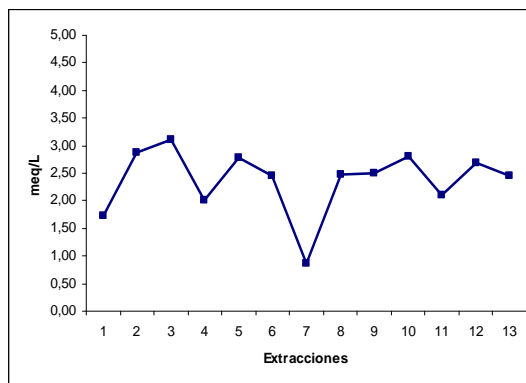
➤ *Siembra Directa:* En superficie, y según muestra el gráfico III.51, la concentración de calcio sufre aumentos y disminuciones moderados, manteniéndose los valores entre un mínimo de 2,41 meq/L y un máximo de 3,29 meq/L.

La evolución de la concentración de calcio en la solución del suelo extraída en profundidad a lo largo del tiempo de estudio es la del gráfico III.52. Aquí se indica como sufre oscilaciones irregulares en un rango de valores más amplio (0,86 meq/L, valor mínimo, en la séptima extracción y 3,11 meq/L valor máximo, en la tercera).

Hay que señalar que aunque la solución en las dos profundidades sufre altibajos irregulares a lo largo de todo el tiempo de estudio es en superficie donde, en la mayoría de las ocasiones, la concentración de calcio es superior (gráf. III.51 y III.52).



Gráf. III.51. Evolución de la concentración de *calcio* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *siembra directa*.



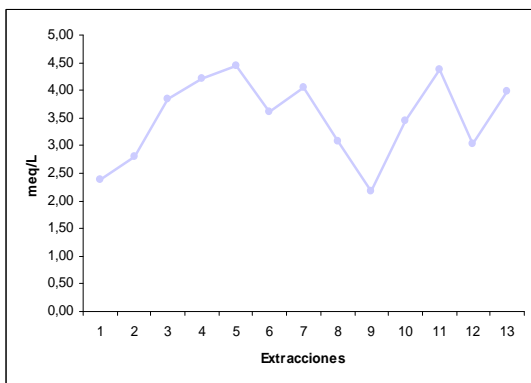
Gráf. III.52. Evolución de la concentración de *calcio* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *siembra directa*.

➤ *Mínimo Laboreo:* según se muestra en la gráfica III.53, a lo largo de la experiencia en el horizonte superficial, el calcio en la solución del suelo sufre oscilaciones irregulares de ascenso-descenso-ascenso en un rango de valores de 3,08 meq/L, valor mínimo, en la novena extracción y 4,44 meq/L valor máximo, en la décimo primera.

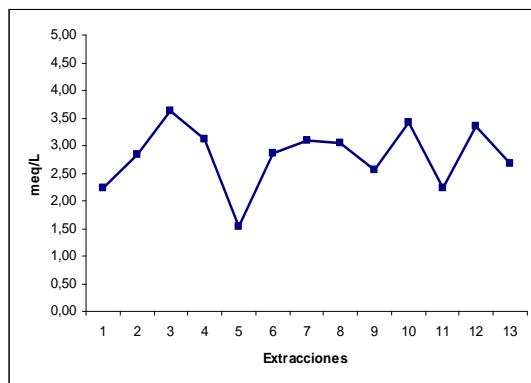
También en la solución del suelo del horizonte subsuperficial el calcio sufre oscilaciones irregulares entre 1,54 meq/L, mínimo, en la novena extracción y 3,62 meq/L

máximo, en la décimo primera. Si bien las concentraciones iniciales y finales (2,24 y 2,67meq/L) son muy similares (gráf. III.54).

En las gráficas III.53 y III.54 se aprecia que la solución del horizonte superficial es más rica en calcio a lo largo toda la experiencia salvo en las extracciones novena y décimo segunda en las que la concentración es algo más baja.

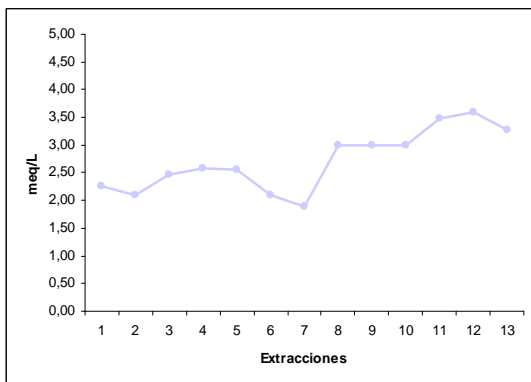


Gráf. III.53. Evolución de la concentración de *calcio* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *mínimo laboreo*.

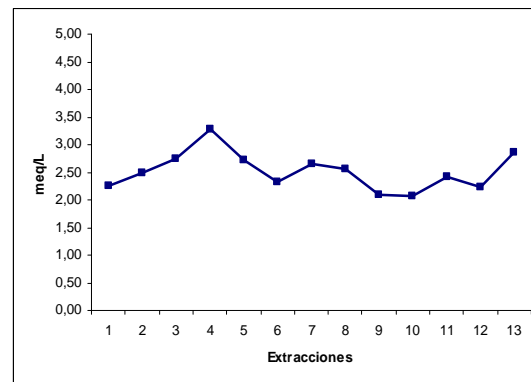


Gráf. III.54. Evolución de la concentración de *calcio* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *mínimo laboreo*.

➤ *Laboreo Convencional*: La liberación de calcio del suelo a la solución del suelo en superficie sigue una tendencia irregular, esto se ve claramente en la gráfica III.55. Primero aumenta la concentración desde 2,26 meq/L hasta 2,57 meq/L, después sufre una disminución progresiva hasta alcanzar el mínimo en la séptima extracción 1,89 meq/L, y a partir de aquí aumenta, llegando a máximos de 3,6 meq/L.



Gráf. III.55. Evolución de la concentración de *calcio* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *laboreo convencional*.

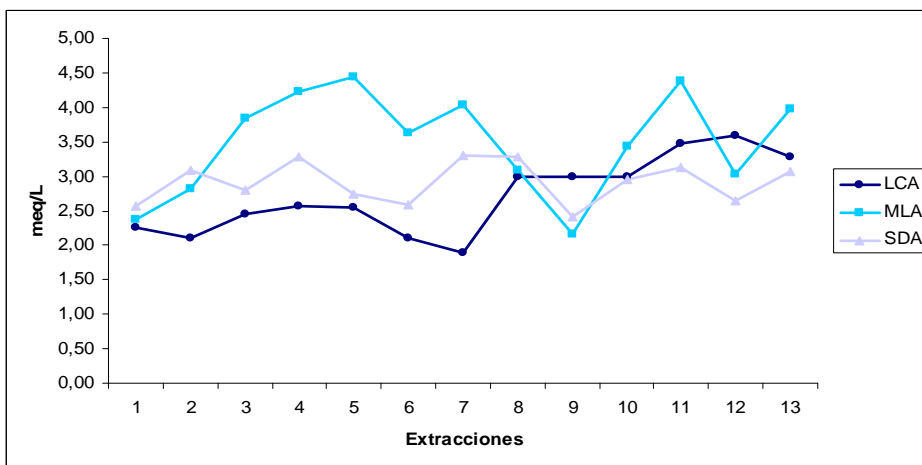


Gráf. III.56. Evolución de la concentración de *calcio* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *laboreo convencional*.

En profundidad el calcio también sigue una tendencia irregular (gráf. III.56). En primer lugar aumenta desde 2,26 meq/L hasta 3,27 meq/L, máximo obtenido, después sufre una disminución progresiva hasta alcanzar el mínimo en la décima extracción 2,08 meq/L, y a partir de aquí, y hasta el final, la concentración aumenta.

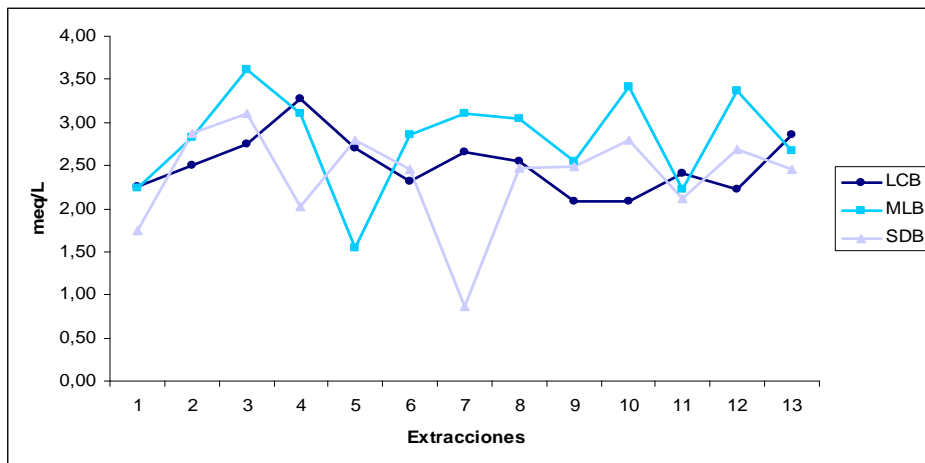
Al comparar la solución del suelo en el perfil completo (gráf. III.55 y III.56) se ve que hasta la mitad de la experiencia las dos curvas son similares, aumento de la concentración primero, seguido de una disminución posterior. Esta disminución en profundidad llega hasta concentraciones similares a las iniciales, siendo en superficie más bajos. En profundidad, en esta primera etapa, es más rica en calcio, sin embargo, a partir de la octava extracción ocurre lo contrario debido a un enriquecimiento en calcio de la solución superficial del suelo y a un empobrecimiento de la subsuperficial.

➤ *Comparativa en el horizonte superficial:* Cuando se compara la solución superficial del suelo de las tres parcelas hay que resaltar que en la mayoría de las extracciones la de mínimo laboreo la más rica en calcio. En las tres se produce primero un aumento de la concentración, hasta la cuarta o quinta extracción, seguido de un descenso que se produce en diferentes momentos de la experiencia para cada una de las parcelas. En la octava extracción se produce un punto de intersección para las tres líneas con valores de entre 3 y 3,28 meq/L. A partir de aquí se produce un aumento en calcio en laboreo convencional mientras que en siembra directa y mínimo laboreo primero ocurre una caída en la concentración de calcio y posteriormente un enriquecimiento moderado en siembra directa y algo más acusado en mínimo laboreo (ver gráf. III.57).



Graf. III.57. Comparativa de evolución de la concentración de calcio en los tres horizontes superficiales.

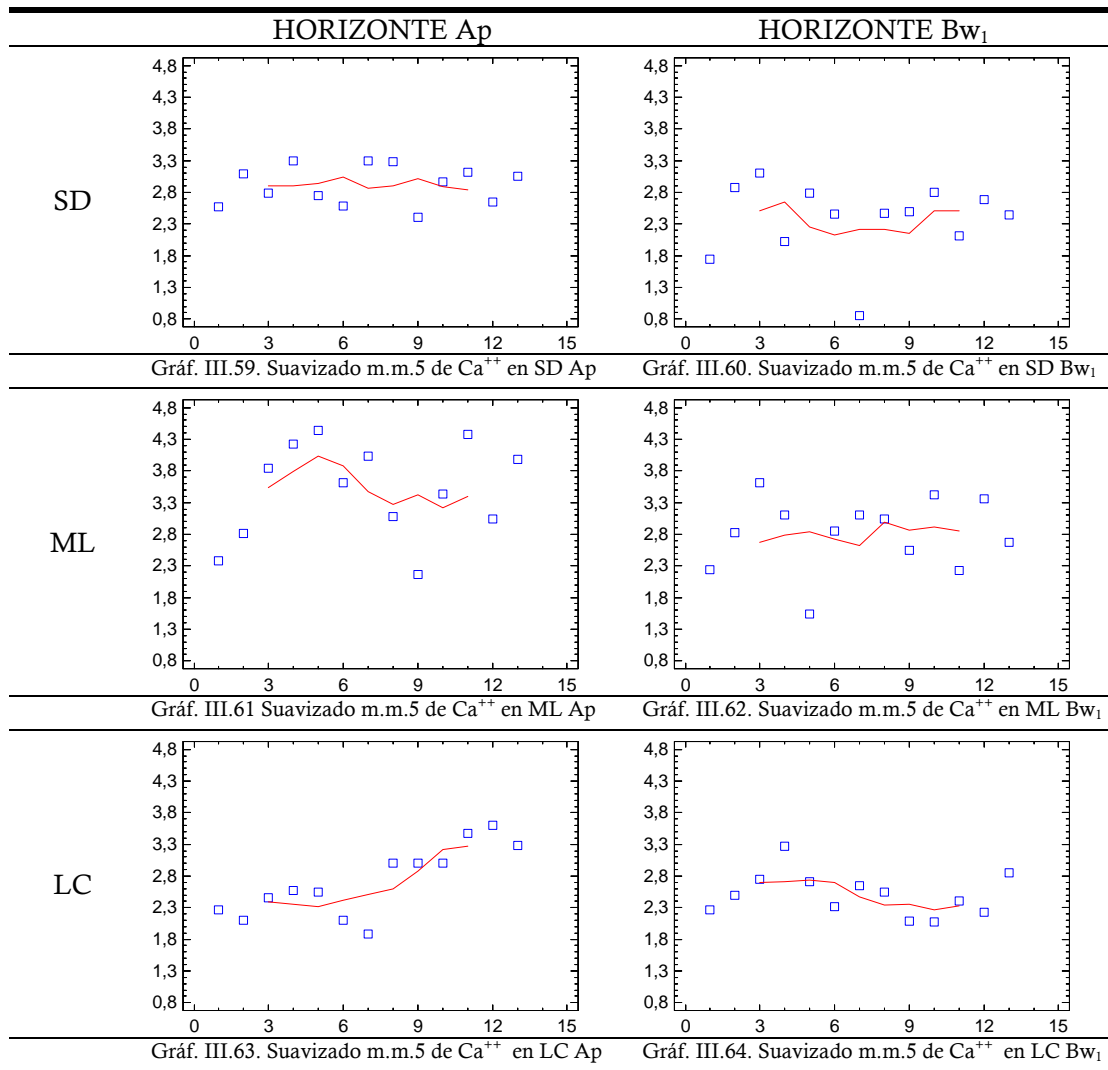
➤ *Comparativa en el horizonte subsuperficial:* En el horizonte profundo las tres soluciones sufren aumentos y disminuciones en la concentración de calcio. Hay que resaltar que las variaciones en la concentración no son muy acusadas ya que en el 72% de los casos se sitúa en el rango de 2 a 3 meq/L (ver gráf. III.58).



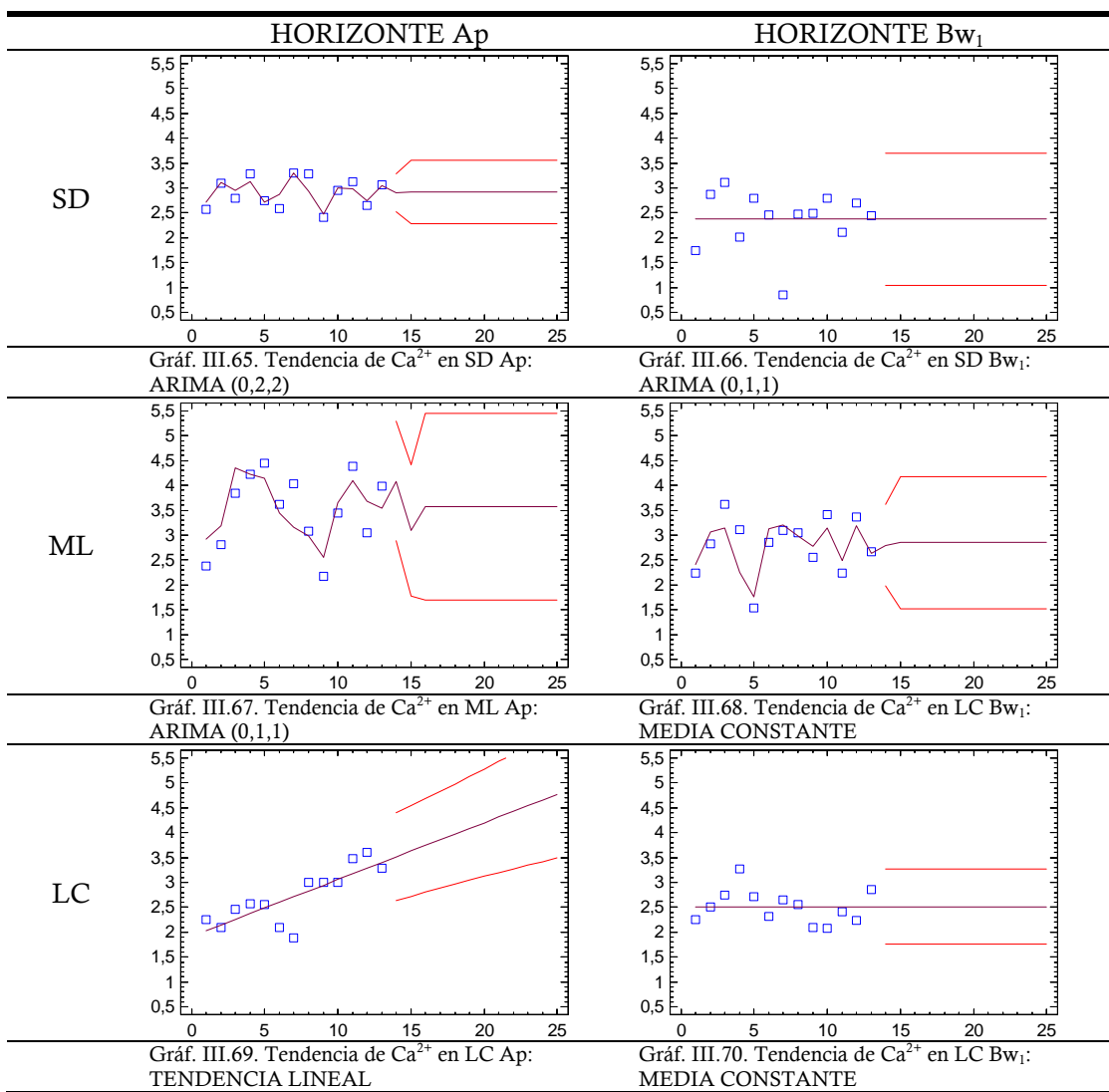
Graf. III.58. Comparativa de evolución de la concentración de calcio en los tres horizontes subsuperficiales.

b) *Análisis de Series Temporales.*

Los gráficos del suavizado mediante las medias móviles a 5 términos para observar mejor la tendencia son del III.59 al III.64. En todos ellos se ve como para el calcio no existe tendencia clara en ninguno de los casos estudiados.



El pronóstico tampoco es muy fiable, ya que los márgenes entre los cuales pueden oscilar los valores que predicen los modelos son demasiado amplios (ver gráf. desde III.65 hasta III.70).



Las fórmulas de las rectas de regresión para los 6 casos de la variable Ca²⁺ están en la tabla III.21:

	A	B
ML	3,28423 + 0,03016 t	2,70423 + 0,01544 t
SD	2,87077 + 0,00593 t	2,33115 + 0,00610 t
LC	1,91500 + 0,11423 t	2,65731 - 0,02060 t

Tabla III.21. Fórmulas de las rectas de regresión de la variable calcio para los 6 casos.

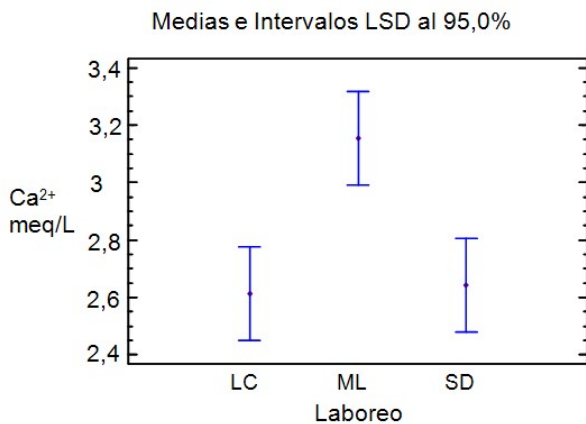
c) ANOVA

Para el caso de la variable calcio los tests estadísticos utilizados han sido F-Test y Kruskal-Wallis. Ambos han detectado diferencia significativa de los valores medios al 95% de confianza para cada uno de los dos factores, técnica de laboreo y profundidad, estudiados. Lo cual indica que según los dos test estadísticos la concentración de calcio en la solución del suelo depende de la técnica de cultivo empleada y del horizonte en que ésta sea extraída.

En la tabla III.22 se recogen las medias de la variable correspondientes a cada técnica de laboreo junto con un análisis de homogeneidad por grupos. Dichos grupos quedan representados con mayor claridad en el gráfico III.71. Tanto en la tabla como en el gráfico se puede distinguir como el calcio, a lo largo de la experiencia, se comporta de forma similar en las parcelas de laboreo convencional y de siembra directa, mientras que en la de mínimo laboreo el comportamiento es diferente, siendo, en ésta, mayor la concentración de calcio en la solución del suelo.

Laboreo	Medidas	Media	Grupos homogéneos
LC	26	2,614	X
SD	26	2,643	X
ML	26	3,154	X

Tabla III.22. Valores medios de la variable calcio para las diferentes técnicas de cultivo y su comportamiento según grupos homogéneos.



Gráf. III.71. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el Ca²⁺ en las tres técnicas de cultivo.

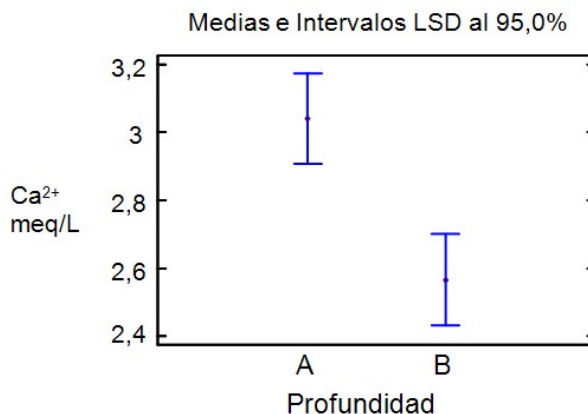
Es necesario señalar que aunque en mínimo laboreo se libera más calcio a la solución del suelo, esto no es significativo, ya que quien determina el nivel de calcio en la solución del suelo es el nivel de calcio cambiante del suelo. Este es alto, tal y como muestra la propia analítica del suelo, y por tanto mantendrá los niveles de calcio en la solución también altos y constantes dentro de unos límites determinados.

Guzmán et al. (2006) y Thomas et al. (2007) deducen en sendos experimentos que el Ca no está muy influenciado por el manejo. Sin embargo, DeMaría et al. (1999) si encontró diferencias en el contenido de calcio en los 5 cm superficiales. Éste, al principio de su estudio encontraba que el contenido más alto era el de siembra directa, seguido de mínimo laboreo y donde menos calcio había en superficie era en laboreo convencional. Pasados once años, siembra directa seguía siendo la de mayor contenido de calcio en superficie pero en las otras dos el contenido era el mismo.

En esta otra tabla (tabla III.23) se hace lo propio para los niveles de profundidad, distinguiéndose medias significativamente diferentes para los dos horizontes muestreados, en el gráfico III.72 se ve como en superficie la solución del suelo es más rica en calcio que en profundidad. Orihuela et al. (2001) deducen, cuando estudian la lixiviación de formas solubles de Ca en suelos francos de Huelva (España), sin embargo, que las diferencias en los contenidos de calcio en las dos profundidades muestreadas no son significativas y que es el calcio cambiante el que gobierna el Ca de la solución del suelo y éste es elevado en un suelo de naturaleza caliza.

Profundidad	Medidas	Media	Grupos homogéneos
A	39	3,041	X
B	39	2,566	X

Tabla III.23. Valores medios de la variable calcio para las diferentes profundidades de extracción y su comportamiento según grupos homogéneos.



Gráf. III.72. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el Ca^{2+} en las dos profundidades de muestreo.

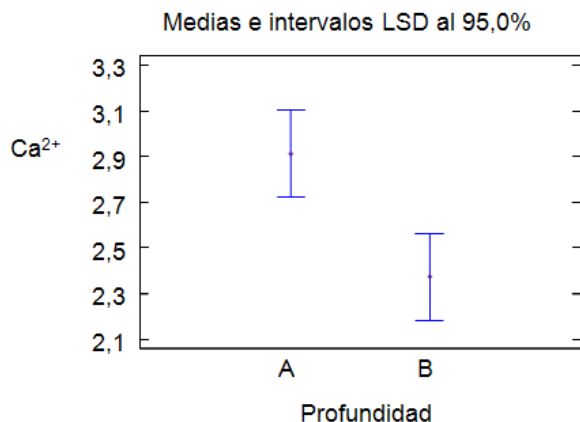
Al realizar un ANOVA por separado para los datos en SD, ML y LC, se estudian más detenidamente las medias para los niveles de profundidad, considerando por separado el comportamiento para cada tipo de técnica de cultivo.

- ANOVA para Ca^{2+} -SD y el factor de profundidad.

Los tests estadísticos F-Test y Kruskal-Wallis indican que la concentración de calcio en la parcela de siembra directa sí depende de la profundidad de extracción de la solución del suelo, siendo ésta mayor en superficie que en profundidad. Las medias y el análisis de homogeneidad de grupos están en la tabla III.24 y en el gráfico III.73 se representan las medias y los intervalos LSD para este caso en concreto.

Profundidad	Medidas	Media	Grupos homogéneos
A	13	2,912	X
B	13	2,374	X

Tabla III.24. Valores medios de la variable calcio para las diferentes profundidades de extracción en la parcela de siembra directa y su comportamiento según grupos homogéneos.



Gráf. III.73. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el Ca^{2+} -SD en las dos profundidades de muestreo.

- ANOVA para Ca^{2+} -ML y el factor de profundidad.

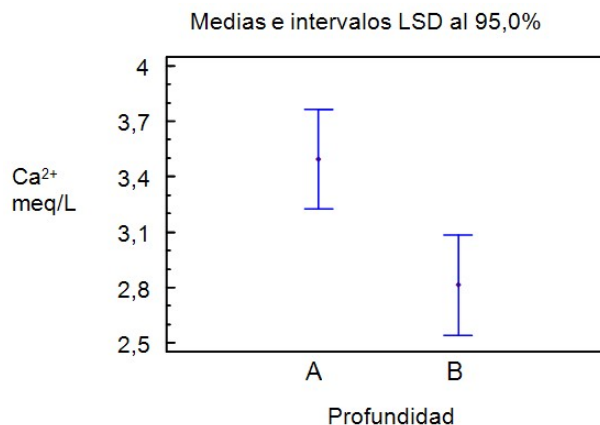
Los resultados de los tests estadísticos F-Test y Kruskal-Wallis muestran, igual que en el caso anterior, que la concentración de calcio en la parcela de mínimo laboreo sí depende de la profundidad de extracción de la solución del suelo.

Las medias y el análisis de homogeneidad de grupos están en la tabla III.25.

Profundidad	Medidas	Media	Grupos homogéneos
A	13	3,495	X
B	13	2,812	X

Tabla III.25. Valores medios de la variable calcio para las diferentes profundidades de extracción en la parcela de mínimo laboreo y su comportamiento según grupos homogéneos.

El gráfico para las medias e intervalos LSD es el III.74.



Gráf. III.74. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el Ca^{2+} -ML en las dos profundidades de muestreo.

➤ ANOVA para Ca^{2+} -LC y el factor de profundidad.

En la parcela de laboreo convencional, al contrario que en las otras dos, los test estadísticos F-Test y Kruskal-Wallis muestran que la concentración de calcio no depende de la profundidad de muestreo.

En la tabla III.26 se muestran las medias y el análisis de homogeneidad de grupos. A partir de estos datos se comprueba como efectivamente no existe diferencia significativa en las medias, por lo que ambos horizontes se comportan de forma homogénea.

Profundidad	Medidas	Media	Grupos homogéneos
A	13	2,715	X
B	13	2,513	X

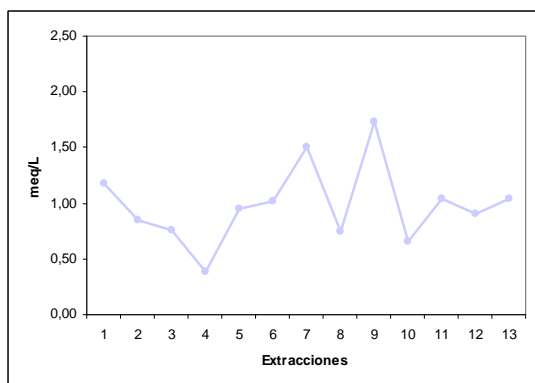
Tabla III.26. Valores medios de la variable calcio para las diferentes profundidades de extracción en la parcela de laboreo convencional y su comportamiento según grupos homogéneos.

III.3.2.2. Magnesio.

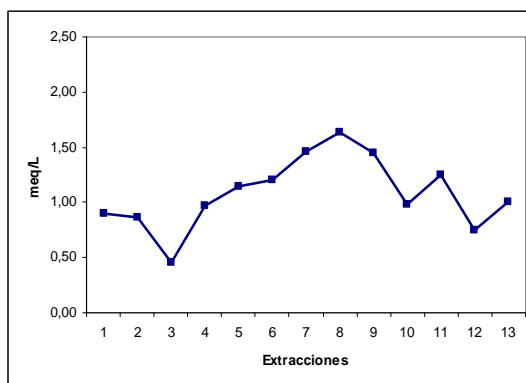
a) Evolución de la concentración de magnesio en la solución del suelo.

➤ *Siembra Directa*: En el horizonte superficial la concentración de magnesio evoluciona con ascensos y descensos sucesivos, tal y como muestra la gráfica III.75. Al principio la concentración desciende progresivamente desde 1,18 meq/L a 0,39 meq/L, a partir de aquí empieza a aumentar hasta llegar a 1,51 meq/L, después sufre un descenso brusco para alcanzar en la novena extracción el valor máximo, 1,73 meq/L. Finalmente la concentración disminuye y al terminar la experiencia la concentración es similar a la inicial.

En el horizonte subsuperficial la concentración de magnesio evoluciona de forma similar a como lo hace en superficie (ver gráf. III.76) aunque al principio los cambios son más rápidos en el horizonte subsuperficial y los picos son más bruscos en la solución de superficie. En esta ocasión los valores inicial (0,90 meq/L) y final (1,01 meq/L) son también similares.



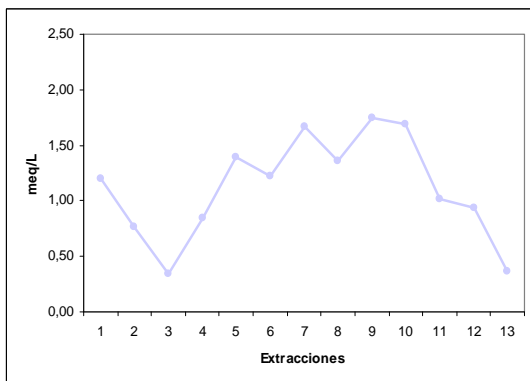
Gráf. III.75. Evolución de la concentración de *magnesio* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *siembra directa*.



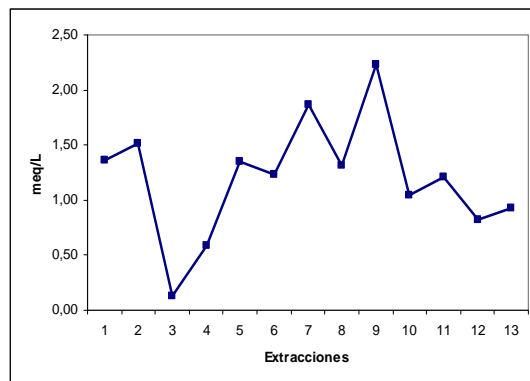
Gráf. III.76. Evolución de la concentración de *magnesio* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *siembra directa*.

➤ *Mínimo Laboreo*: Según se representa en la gráfica III.77 la concentración de magnesio en la solución del suelo superficial disminuye desde 1,20 meq/L a 0,34 meq/L. A partir de aquí sigue una evolución ascendente hasta alcanzar valores máximos próximos a 1,7 meq/L en las extracciones novena y décima para descender progresivamente hasta el final de la experiencia, llegando a 0,36 meq/L.

En el horizonte subsuperficial el magnesio se comporta de manera similar a como lo hace en el horizonte superficial. Los aumentos y disminuciones de concentración se producen en las mismas extracciones, si bien, hay que notar que en el horizonte subsuperficial los picos son más acusados ya que el rango en el que oscilan las concentraciones es de 0,13 meq/L a 2,23 meq/L (gráf. III.78).



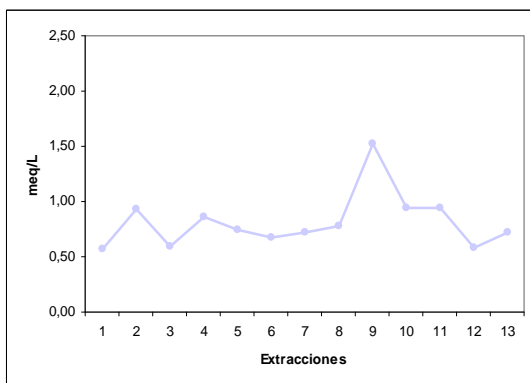
Gráf. III.77. Evolución de la concentración de *magnesio* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *mínimo laboreo*.



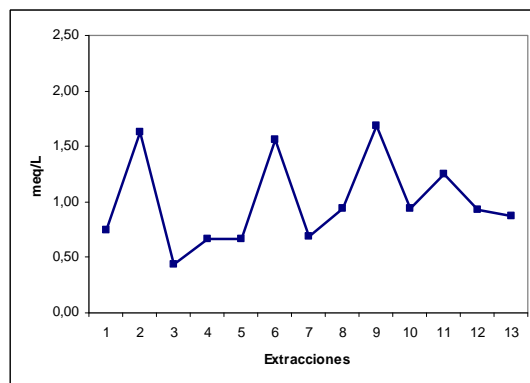
Gráf. III.78. Evolución de la concentración de *magnesio* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *mínimo laboreo*.

➤ *Laboreo Convencional*: Tal y como se ve en la gráfica III. 79 la concentración de magnesio en la solución del suelo en superficie aumenta desde el inicio, 0,57 meq/L, hasta la novena extracción, en la que alcanza el máximo de 1,52 meq/L, a partir de aquí se produce un descenso de la concentración, aún así la concentración final, 0,72 meq/L de potasio es mayor que la inicial 0,57 meq/L.

En el horizonte subsuperficial la concentración de magnesio presenta picos de aumentos y disminuciones cada 3 ó 4 extracciones, siendo 1,69 meq/L el valor máximo y 0,44 meq/L el mínimo (ver gráf. III.80).



Gráf. III.79. Evolución de la concentración de *magnesio* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *laboreo convencional*.

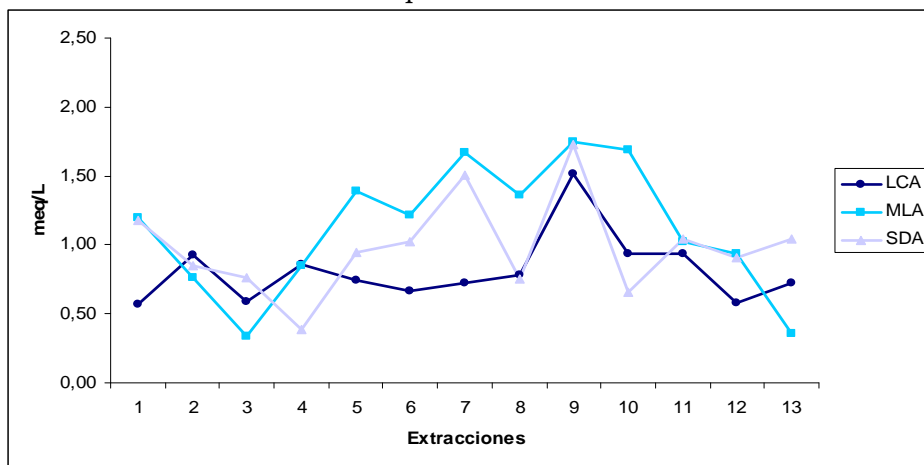


Gráf. III.80. Evolución de la concentración de *magnesio* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *laboreo convencional*.

Cuando se compara la evolución de la concentración del magnesio de la solución del suelo en los dos horizontes (ver gráficos III.79 y III.80) se observa que, los aumentos y disminuciones de concentración se producen en las mismas extracciones, si bien, hay que

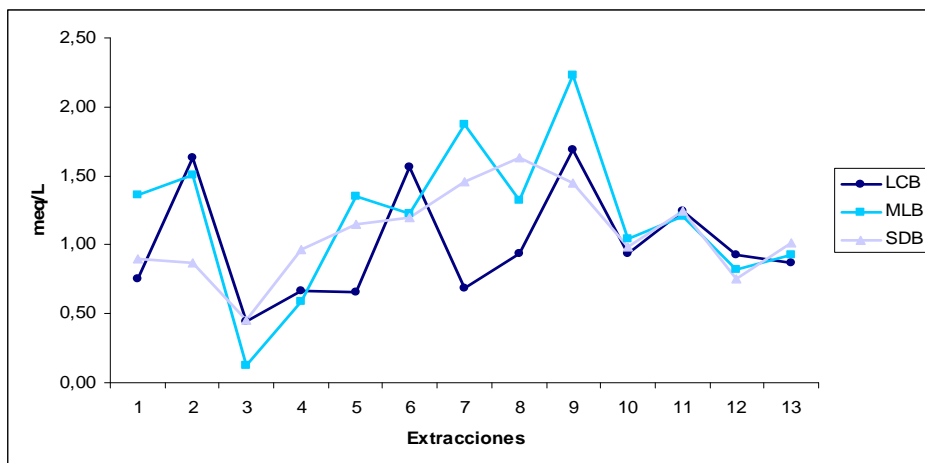
notar que en el horizonte subsuperficial los picos son mucho más acusados. A pesar de esos picos los valores iniciales y finales en cada horizonte son similares. En superficie el valor inicial es 0,57 meq/L y el valor final, 0,72 meq/L, y en profundidad el valor inicial es 0,75 meq/L y el valor final 0,87 meq/L.

➤ *Comparativa en el horizonte superficial:* A partir de la gráfica III.81 se comprueba como existe similitud en los altibajos de concentración, esto es, los ciclos de aumentos y disminuciones en la concentración de magnesio se producen en las mismas extracciones, esta similitud es más acusada entre mínimo laboreo y siembra directa, estando laboreo convencional algo más desfasado de estos dos. En cuanto a la concentración, en mínimo laboreo se libera más magnesio a la solución del suelo a lo largo de toda la experiencia, siendo la de laboreo convencional en la que menos.



Graf. III.81. Comparativa de evolución de la concentración de magnesio en los tres horizontes superficiales.

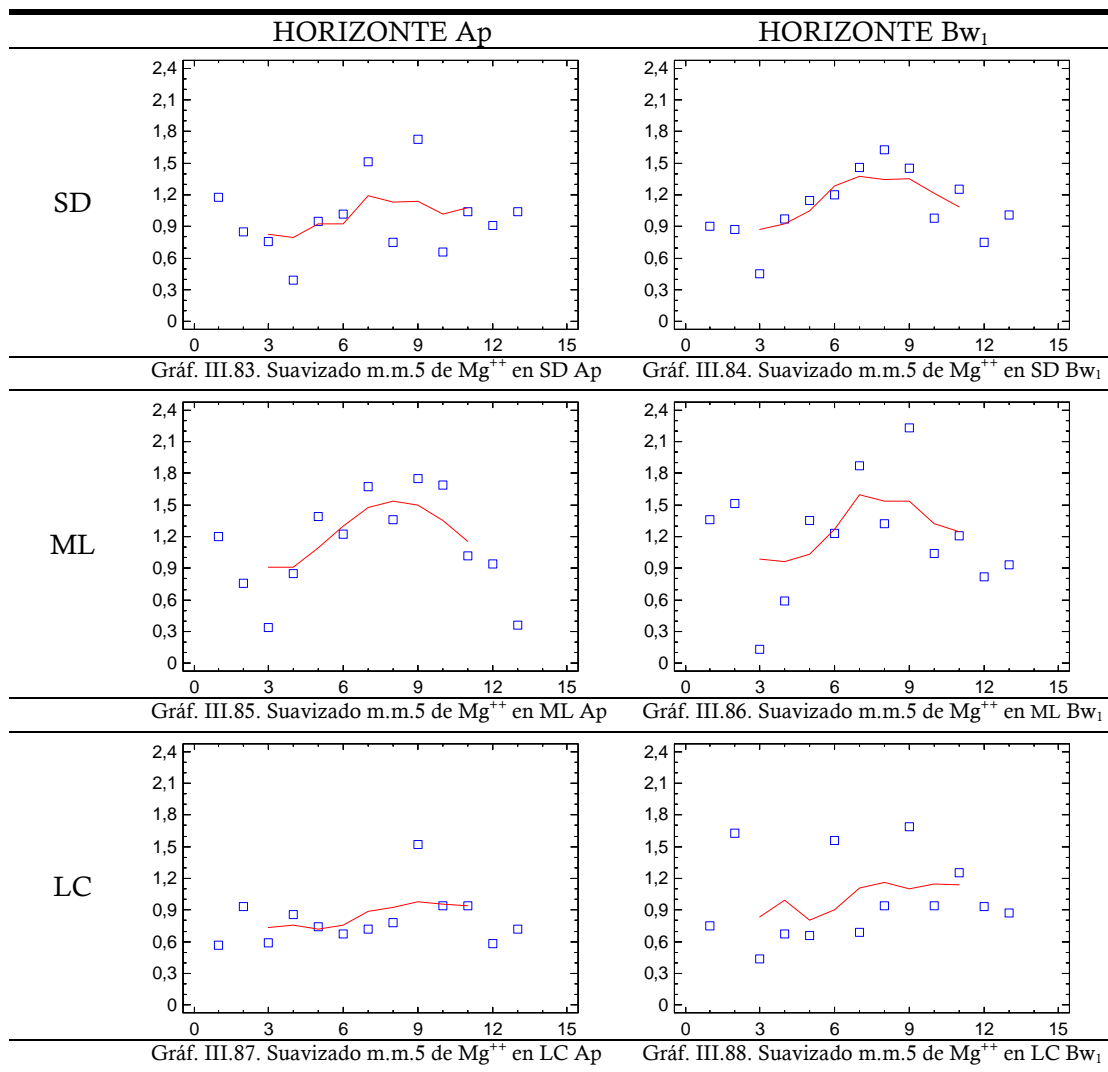
➤ *Comparativa en el horizonte subsuperficial:* Al comparar el contenido en magnesio en los tres horizontes subsuperficiales (gráf. III.82) se aprecia como las tendencias ascendentes y descendentes se producen de manera simultánea en los tres perfiles, incluso en las cuatro últimas extracciones los valores en los tres casos son los mismos.



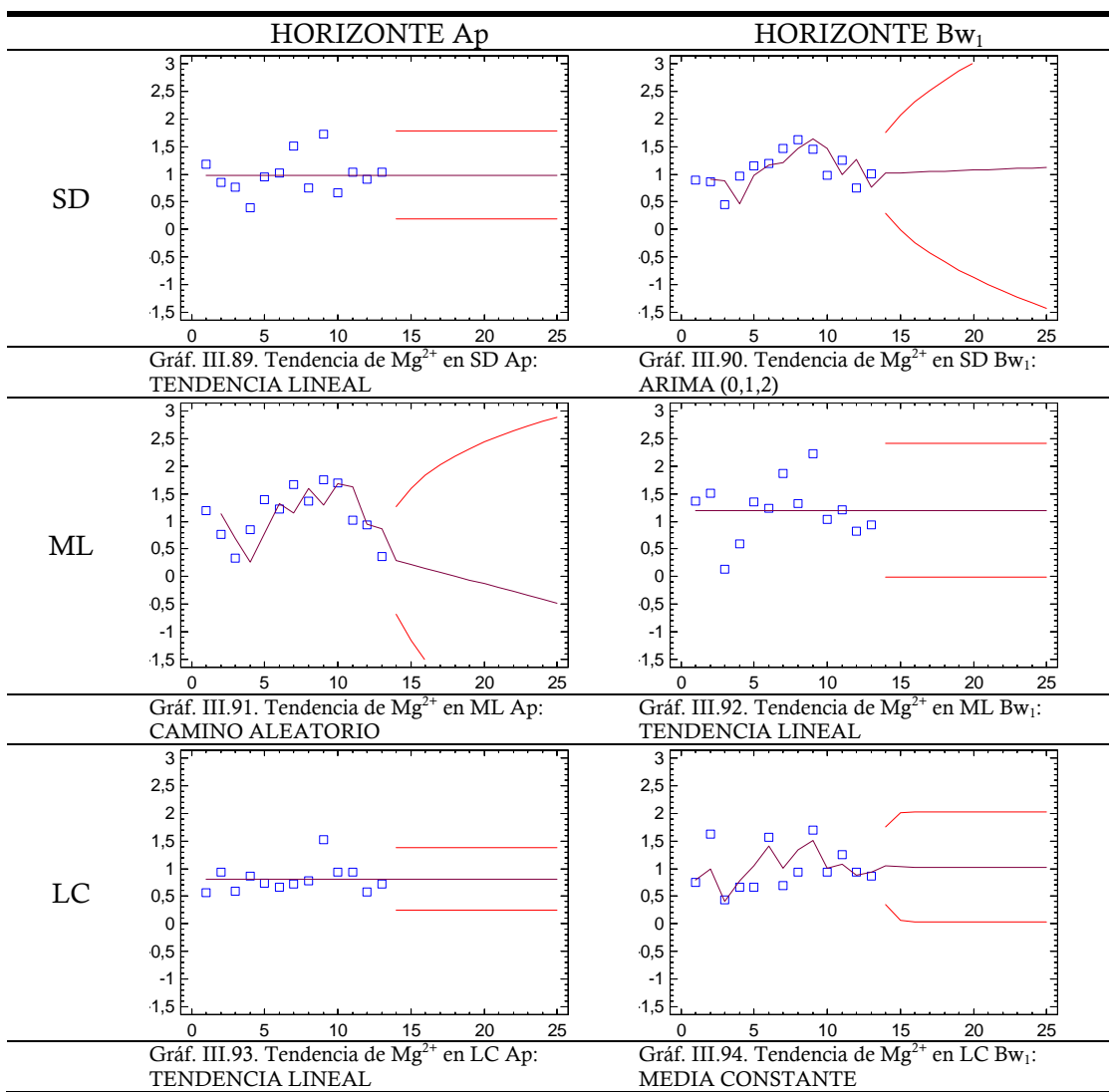
Graf. III.82. Comparativa de evolución de la concentración de magnesio en los tres horizontes subsuperficiales.

b) *Análisis de Series Temporales.*

Los gráficos de las medias móviles a 5 términos (desde el III.83 hasta el III.88) muestran que al igual que en el caso del otro catión divalente –calcio- no existe una tendencia clara en el comportamiento de la concentración de magnesio en la solución del suelo.



Las predicciones según el criterio Akaike son las que aparecen debajo de cada gráfico (gráf. de III.89 a III.94). Para el magnesio en ninguno de los casos estudiados la predicción es fiable debido a que, según se ve en los gráficos, la amplitud que marcan las líneas en la que pueden oscilar los valores futuros es muy grande.



A continuación se incluyen las fórmulas de las rectas de regresión para los 6 casos de la variable Mg²⁺ (tabla III.27):

	A	B
ML	1,043850 + 0,010769 t	1,141920 + 0,008187 t
SD	0,880769 + 0,014725 t	0,916154 + 0,023736 t
LC	0,717692 + 0,013517 t	0,897308 + 0,014890 t

Tabla III.27. Fórmulas de las rectas de regresión de la variable magnesio para los 6 casos.

c) ANOVA.

La tabla III.28 indica qué tests han detectado diferencia significativa de los valores medios al 95% de confianza para cada uno de los dos factores, técnica de laboreo y profundidad, estudiados:

	F-Test	Kruskal-Wallis
Técnica de laboreo	no	si
Profundidad	no	no

Tabla III.28. Diferencia significativa de los valores medios al 95% de confianza para cada uno de los dos factores, técnica de laboreo y profundidad, según los dos test estadísticos utilizados.

Ninguno de los dos test detecta dependencia del magnesio en la solución del suelo en relación con el horizonte del que se extraiga la muestra. En relación al factor técnica de laboreo si reconoce dependencia el de Kruskal-Wallis pero no el F-Test.

En la tabla III.29 están las medias de la variable correspondientes a cada nivel de laboreo junto con un análisis de homogeneidad por grupos.

Laboreo	Medidas	Media	Grupos homogéneos
LC	26	0,907	X
SD	26	1,033	X X
ML	26	1,159	X

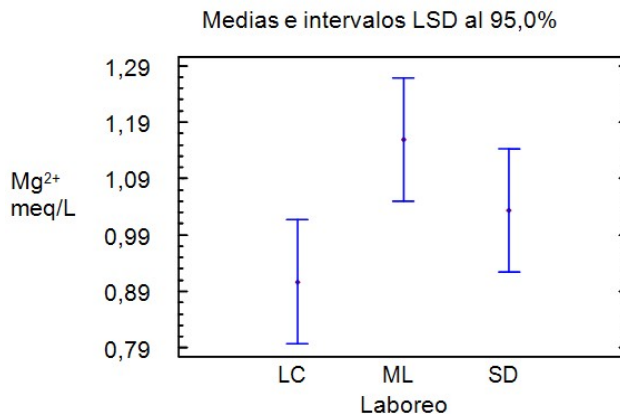
Tabla III.29. Valores medios de la variable magnesio para las diferentes técnicas de cultivo y su comportamiento según grupos homogéneos.

Mínimo laboreo es quien más magnesio libera a la solución del suelo, seguida de siembra directa, siendo la de laboreo convencional la que menos. Se observa que las medias para el par LC-SD, por un lado, y para el par SD-ML, por otro, pueden considerarse iguales. Por el contrario, existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias para LC y ML. Estos datos pueden ser contrastados en el gráfico III.95.

En la bibliografía relacionada los resultados encontrados para este elemento son dispares. Por un lado, autores como Thomas et al. (2007), Guzmán et al. (2006) y Matowo et al (1999) encuentran mayores contenidos de magnesio cambiante en suelos bajo laboreo convencional que sobre siembra directa y/o mínimo laboreo. Pero por otro lado, Franzluebbbers et al. (1996) no ven influencia del tipo de manejo en el contenido de magnesio cambiante en un Fluventic Ustochrept de Texas.

En cuanto a la dependencia de la profundidad muestreada ocurre lo mismo: Carvalho et al. (2007) y Guzmán et al. (2006) determinan mayores contenidos de magnesio en los horizontes superficiales, mientras que Standley et al. (1990) obtienen que la profundidad no es determinante. Por su parte, Franzluebbbers et al. (1996) encuentran primero un aumento en los primeros centímetros del perfil, posteriormente una disminución y en profundidad un

nuevo aumento hasta valores similares a los de la superficie, fenómeno que explican por el consumo del cultivo, o bien, por la existencia de un horizonte con menor contenido en magnesio.



Gráf. III.95. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para el Mg^{2+} en las tres técnicas de cultivo.

III.3.2.3. Comparativa de cationes divalentes.

El calcio está de sobra en el suelo y por tanto en la solución del suelo también. Ya que es el calcio cambiante el que determina el contenido de calcio en la solución del suelo. Aunque el ANOVA muestre diferencias entre técnicas o incluso a diferentes profundidades, estas diferencias no son significativas debido a ese exceso de calcio en el suelo.

La solución del suelo más rica en magnesio es la de mínimo laboreo, seguida de la de siembra directa, siendo la de laboreo convencional la más pobre.

En el caso del magnesio ya no existe influencia del factor profundidad, al contrario de los que ocurría en los cationes monovalentes.

Tampoco aquí se observan tendencias claras de aumentos o disminuciones como ocurría con los monovalentes. En el magnesio lo que se ven son picos de aumentos y disminuciones, en los que coinciden las tres técnicas de cultivo, y que definen los tiempos necesarios para restablecer el equilibrio de las soluciones interna y externa del suelo.

III.3.3. Aniones.

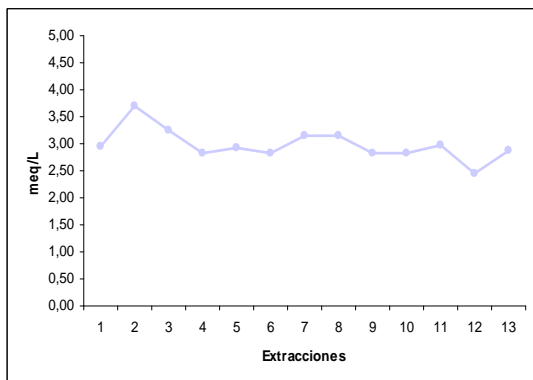
III.3.3.1. Bicarbonatos.

a) Evolución de la concentración de bicarbonatos en la solución del suelo.

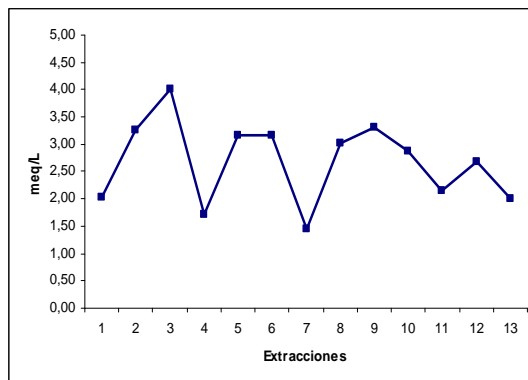
➤ *Siembra Directa*: Como muestra la gráfica III.96 la concentración de bicarbonatos en superficie se mantiene más o menos constante y en torno a 3 meq/L.

Sin embargo, tal y como se ve en la gráfica III.97, a lo largo de la experiencia la evolución de la concentración de bicarbonatos en la solución profunda sufre oscilaciones irregulares en un rango de, 1,44 meq/L, valor mínimo, en la séptima extracción y 4,01 meq/L, valor máximo, en la tercera.

Al estudiar la evolución de la concentración de bicarbonatos en la solución del suelo en el perfil completo de siembra directa, comparando los gráficos III.96 y III.97 se aprecia que la concentración es más regular en el horizonte superficial.



III.96. Evolución de la concentración de bicarbonatos en cada una de las extracciones en el horizonte superficial en siembra directa.

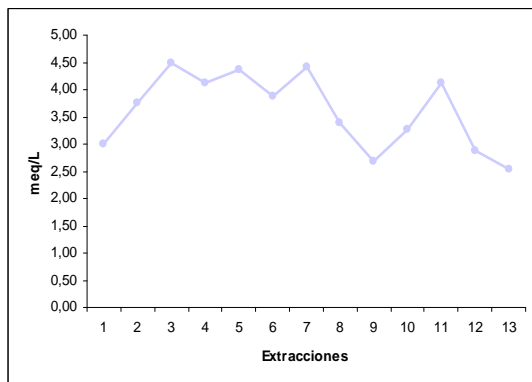


Gráf. III.97. Evolución de la concentración de bicarbonatos en cada una de las extracciones en el horizonte subsuperficial en siembra directa.

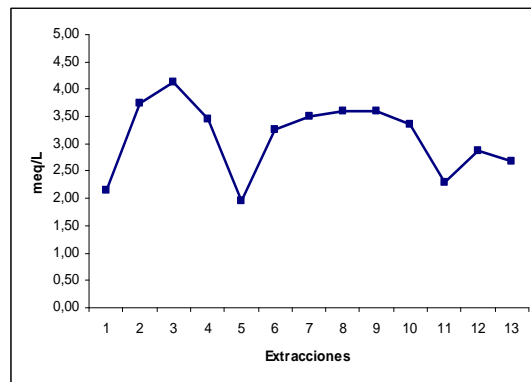
➤ *Mínimo Laboreo*: La concentración de bicarbonatos en la solución del suelo en superficie evoluciona desde un máximo de 4,49 meq/L en la tercera extracción y un mínimo de 2,54 meq/L en la última (gráf. III.98).

Como se ve en la gráf. III.99 en el horizonte subsuperficial la concentración en primer lugar aumenta desde la primera extracción (2,14 meq/L) hasta la tercera (4,12 meq/L, valor máximo), desde aquí y hasta la quinta la concentración disminuye igualando la concentración de partida. La sexta extracción supone un aumento de concentración, a partir de ésta y hasta la décima el valor de bicarbonatos en la solución del suelo será de 3,50 meq/L, en el último tramo de la experiencia la concentración disminuye siendo el valor en la última extracción (2,68 meq/L) superior al inicial.

Al comparar la evolución de la concentración de bicarbonatos en la solución del suelo en el perfil completo (gráf. III.98 y III.99) se ve que en los dos horizontes existen picos en la concentración. A lo largo de la experiencia la solución del horizonte superficial es más rica en bicarbonatos en mayor número de ocasiones.



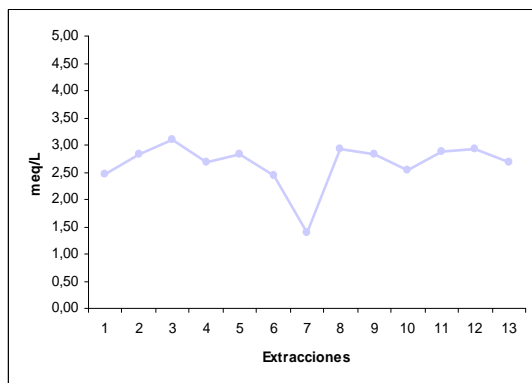
Gráf. III.98. Evolución de la concentración de bicarbonatos en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *mínimo laboreo*.



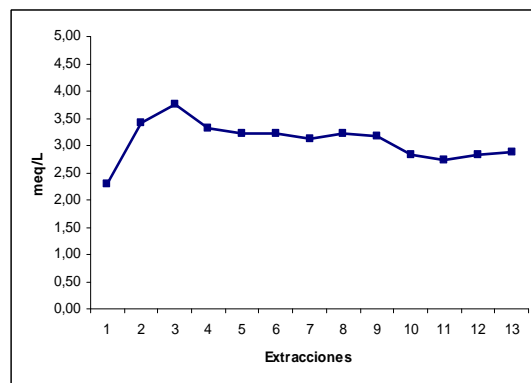
Gráf. III.99. Evolución de la concentración de bicarbonatos en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *mínimo laboreo*.

➤ *Laboreo Convencional*: En las extracciones de solución del suelo del horizonte superficial la concentración de bicarbonatos se mantiene en un intervalo que oscila entre 2,5 y 3,5 meq/L, salvo en la séptima extracción en la que se produce un descenso acusado hasta un mínimo de 1,37 meq/L (gráf. III.100).

En el horizonte subsuperficial la concentración de bicarbonatos experimenta primero un ascenso desde los 2,30 meq/L iniciales hasta 3,75 meq/L, concentración máxima, alcanzada en la tercera extracción. A partir de aquí se produce un descenso progresivo hasta la décimo primera extracción, a partir de ella el valor se mantiene constante (2,85 meq/L) (gráf. III.101).



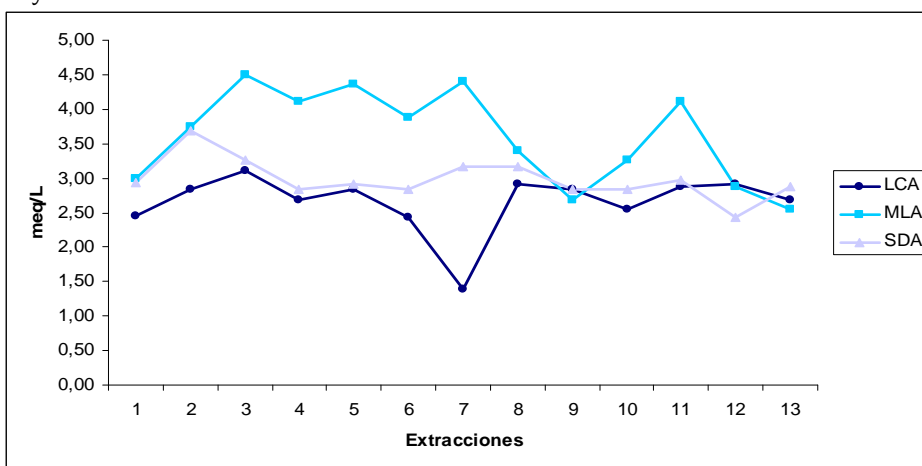
Gráf. III.100. Evolución de la concentración de bicarbonatos en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *laboreo convencional*.



Gráf. III.101. Evolución de la concentración de bicarbonatos en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *laboreo convencional*.

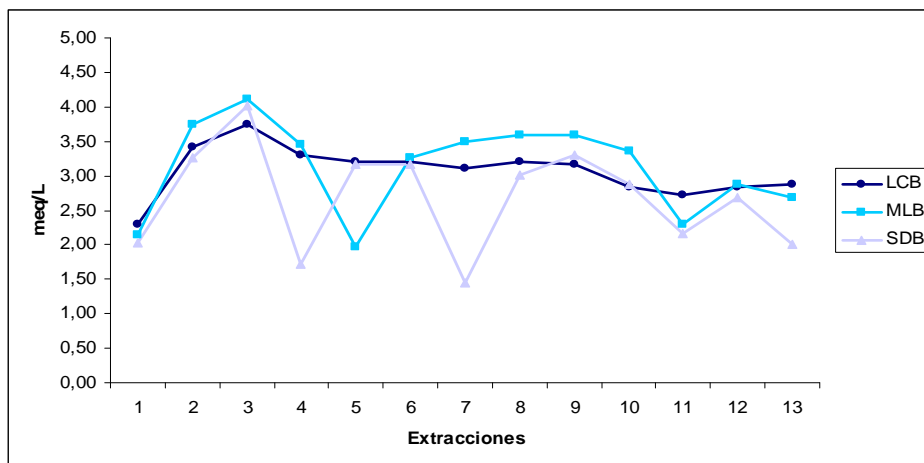
Quando se compara la evolución de la concentración de bicarbonatos en la solución del suelo en el perfil completo, según estudio conjunto de las gráf. III. 100 y III.101, se comprueba como durante casi toda la experiencia, la solución del horizonte subsuperficial es más rica.

➤ *Comparativa en el horizonte superficial:* En la gráf. III.102 se compara la solución del suelo de los tres horizontes superficiales, y a partir de ella se establece que a lo largo de la experiencia la solución más rica en bicarbonatos es la de mínimo laboreo, seguida de la de siembra directa, siendo la más pobre la de laboreo convencional. De las tres, la de siembra directa es bastante más regular, seguida de la de laboreo convencional, siendo la más irregular y con cierta tendencia descendente la de mínimo laboreo.



Graf. III.102. Comparativa de evolución de la concentración de bicarbonatos en los tres horizontes superficiales.

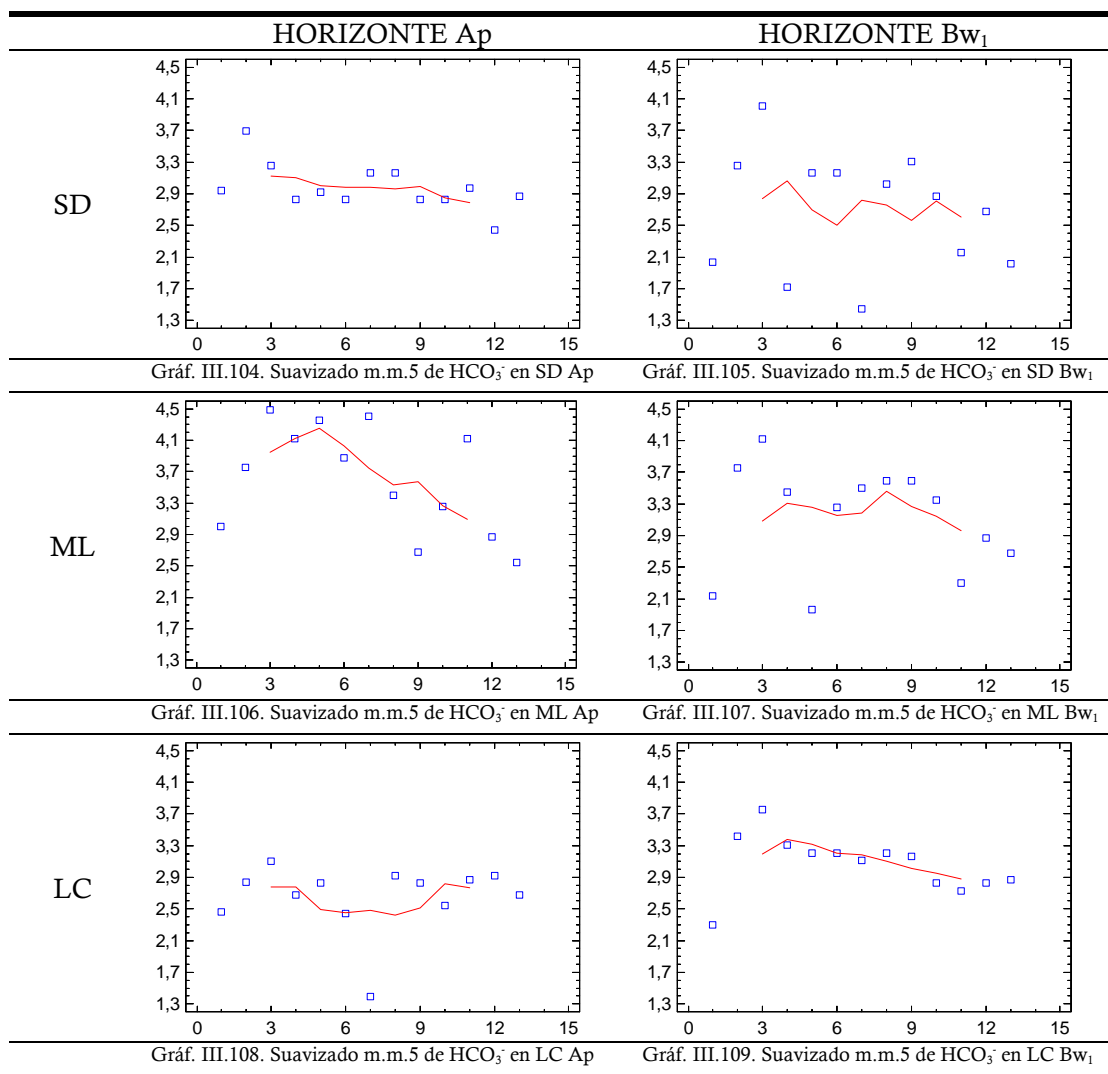
➤ *Comparativa en el horizonte subsuperficial:* Cuando se compara la concentración de bicarbonatos en la solución del suelo de los tres horizontes subsuperficiales (gráf. III.103) se aprecia que, en general, la solución más rica en bicarbonatos es la de mínimo laboreo, seguida de la de laboreo convencional, siendo la más pobre y la que presenta más irregularidades la de siembra directa.



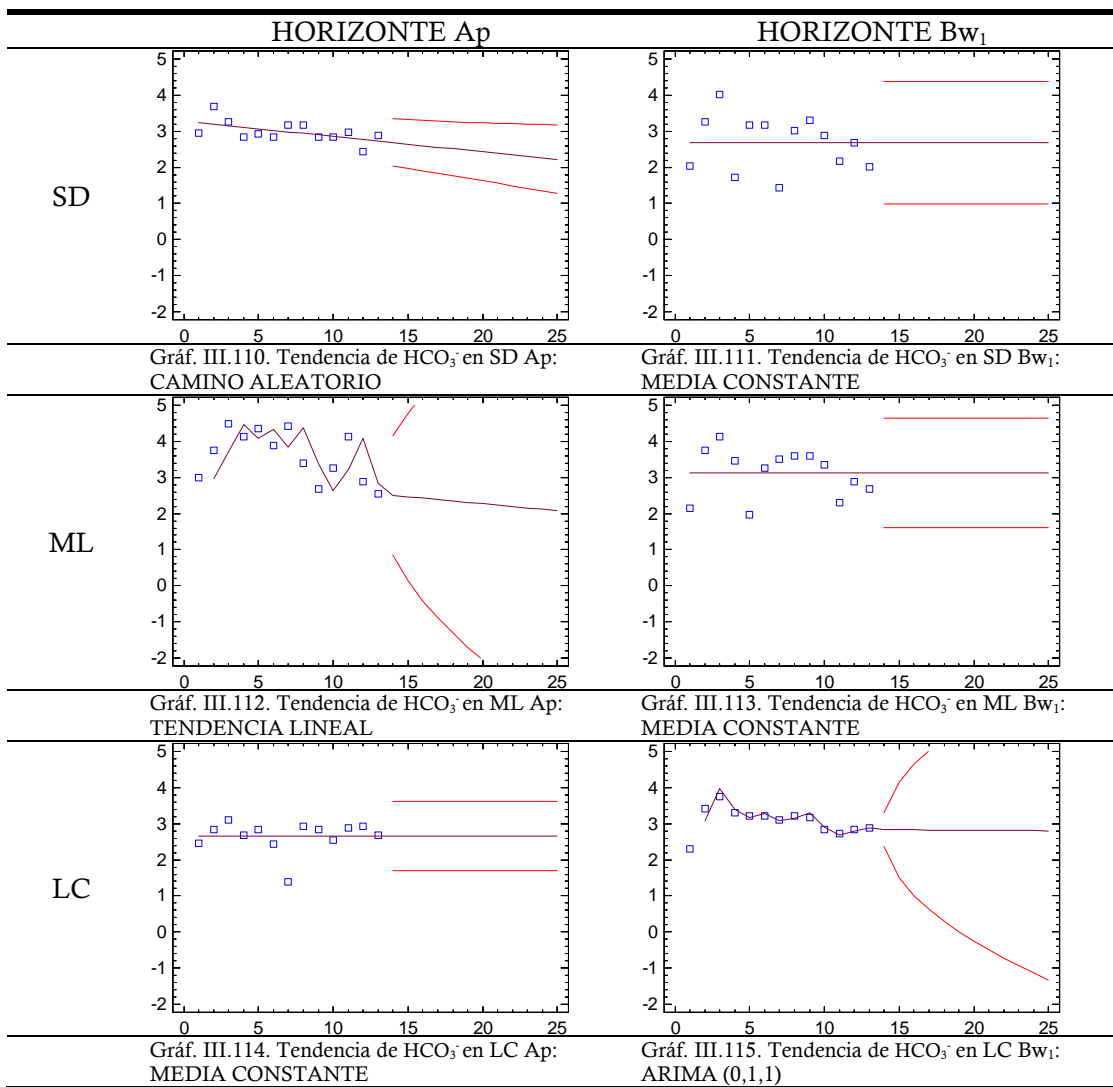
Graf. III.103. Comparativa de evolución de la concentración de bicarbonatos en los tres horizontes subsuperficiales.

b) *Análisis de Series Temporales.*

Del examen visual que facilita la suavización mediante medias móviles a cinco términos se desprende, en todos los casos y con ciertas irregularidades, una ligera tendencia decreciente (gráf. de III.104 a III.109).



El pronóstico según el modelo óptimo en función del criterio de Akaike es el que se muestra en los gráf. desde el III.110 hasta III.115. También en el caso de los bicarbonatos ocurre como para los cationes bivalentes, esto es, la predicción no es buena ya que los límites (líneas rojas) son demasiado amplios.



En la tabla III.30 se incluyen las fórmulas de las rectas de regresión de la variable HCO₃⁻ para los 6 casos.

	A	B
ML	4,18538 - 0,08275 t	3,31808 - 0,02830 t
SD	3,27462 - 0,04220 t	2,94115 - 0,03742 t
LC	2,62077 + 0,00473 t	3,27038 - 0,02830 t

Tabla III.30. Fórmulas de las rectas de regresión de la variable bicarbonatos para los 6 casos.

c) ANOVA.

La tabla III.31 indica qué tests han detectado diferencia significativa de los valores medios al 95% de confianza para cada uno de los dos factores estudiados, técnica de laboreo y profundidad. En ella queda reflejado que la concentración de bicarbonatos no depende de la profundidad de extracción de la muestra (según los dos índices), aunque sí de la técnica de laboreo.

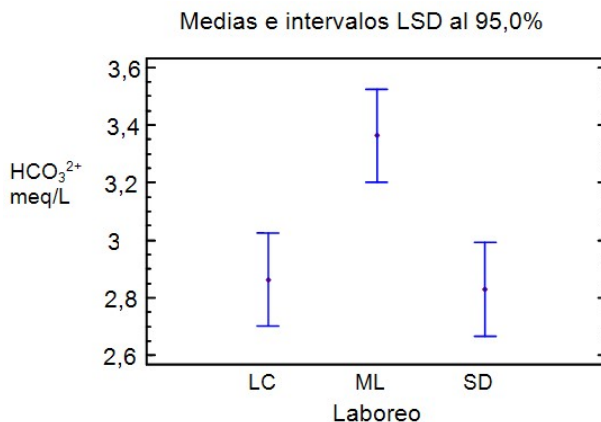
	F-Test	Kruskal-Wallis
Técnica de laboreo	si	si
Profundidad	no	no

Tabla III.31. Diferencia significativa de los valores medios al 95% de confianza para cada uno de los dos factores, técnica de laboreo y profundidad, según los dos test estadísticos utilizados.

En la tabla III.32 se presentan las medias de la variable correspondientes a cada nivel de laboreo junto con un análisis de homogeneidad por grupos. La última columna indica que existe un comportamiento homogéneo para las técnicas de laboreo SD y LC diferenciado de la técnica ML. Ello queda de manifiesto en el gráfico III.116, en donde se ve claramente que en mínimo laboreo la concentración de bicarbonatos en la solución del suelo es mayor que en las otras dos técnicas de cultivo.

Laboreo	Medidas	Media	Grupos homogéneos
SD	26	2,82923	X
LC	26	2,86308	X
ML	26	3,36308	X

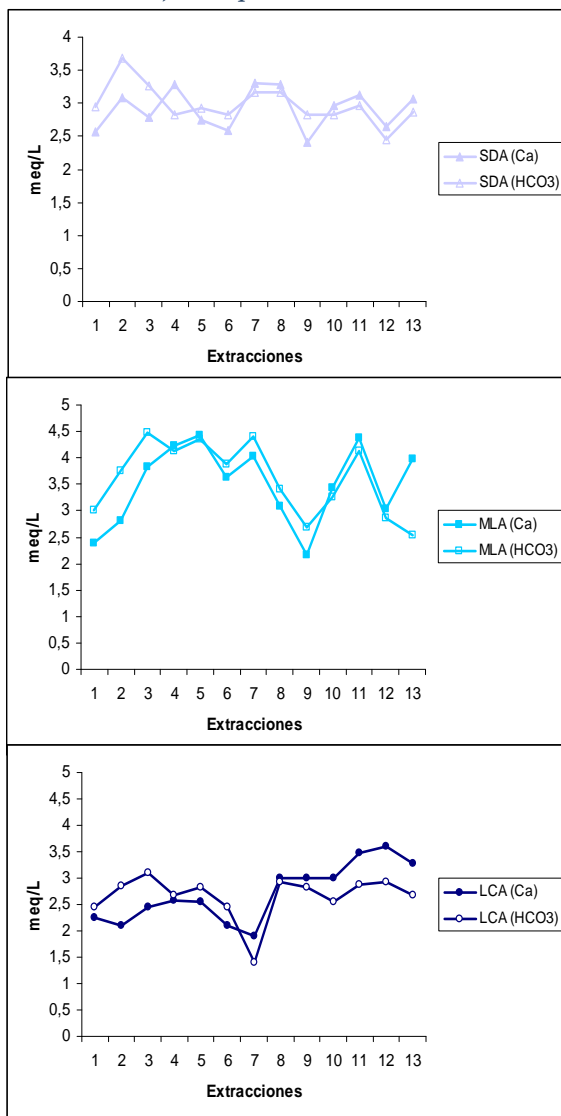
Tabla III.32. Valores medios de la variable bicarbonatos para las diferentes técnicas de cultivo y su comportamiento según grupos homogéneos.



Gráf. III.116. Medias e intervalos LSD al 95% de confianza para HCO₃²⁻ en las tres técnicas de cultivo.

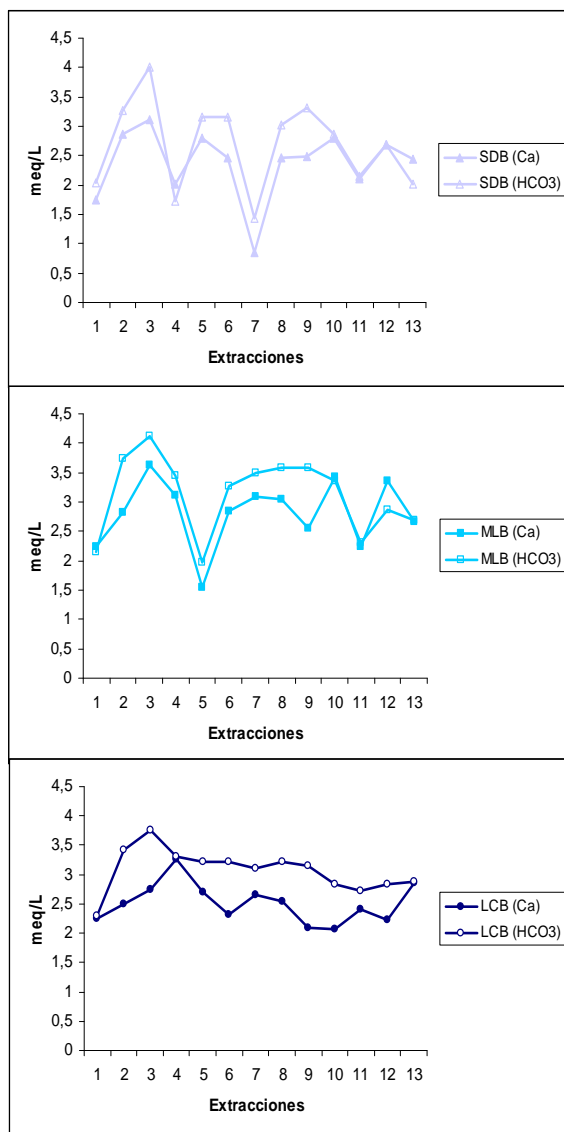
No existen estudios previos en los que se determine la influencia de la técnica de cultivo empleada, por un lado, o de la profundidad de muestreo, por otro, en el contenido en bicarbonatos en la solución del suelo. Ni siquiera se han encontrado datos de estas influencias sobre la concentración de aniones en muestras de suelo, tal y como ocurría en el caso de los cationes.

d) Comparativa con calcio.



En las gráficas de la izquierda (III.117, III.118 y III.119) se representan las concentraciones de calcio y bicarbonatos en la solución del suelo, por parejas, en el horizonte superficial según la técnica de cultivo. En las tres se ve perfectamente como la evolución de la concentración de ambos es la misma. Esto es, la liberación es por disolución del bicarbonato cálcico del suelo y posterior separación del catión y anión.

Gráf. III.117, III.118 y III.119. Evolución de Ca^{2+} y HCO_3^{2-} en superficie y según técnica de cultivo.



En el horizonte subsuperficial también se produce la similitud en la evolución de la concentración de calcio y bicarbonatos en la solución del suelo en siembra directa (gráf. III.120) y en mínimo laboreo (gráf. III.121). En el caso de laboreo convencional la similitud es bastante menor (Gráf. III.122)

Gráf. III.120, III.121 y III.122. Evolución de Ca²⁺ y HCO₃²⁻ en profundidad y según técnica de cultivo.

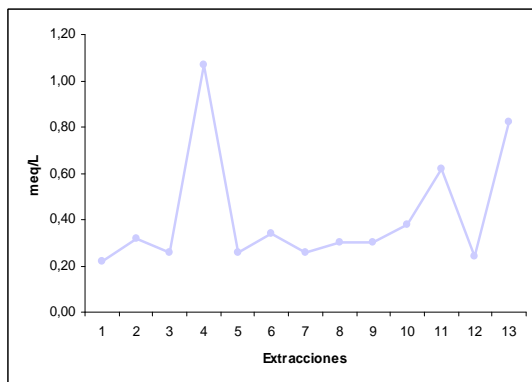
III.3.3.2. Sulfatos.

a) Evolución de la concentración de sulfatos en la solución del suelo.

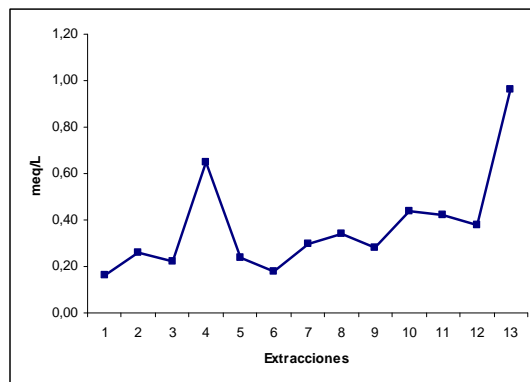
➤ *Siembra Directa:* En 10 de las 13 extracciones del horizonte superficial de siembra directa el contenido en sulfatos en la solución del suelo se encuentra en el intervalo de 0,2 a 0,4 meq/L. En las tres ocasiones restantes la concentración sufre un brusco ascenso, hasta valores incluso de 1,07 meq/L en la cuarta extracción (ver gráf. III.123).

En el horizonte subsuperficial, en 11 de las 13 extracciones el contenido en sulfatos en la solución del suelo se encuentra en el intervalo de 0,15 a 0,45 meq/L. En las dos ocasiones restantes la concentración sufre un brusco ascenso, hasta valores incluso de 0,96 meq/L en la última extracción (ver gráf. III.124).

Cuando se estudian de forma conjunta los dos horizontes de la parcela de siembra directa, comparando los gráf. III.123 y III.124, se comprueba como las dos líneas casi se superponen. En los dos casos los valores tienen una moderada tendencia ascendente presentando picos comunes en las extracciones cuarta y última.



Gráf. III.123. Evolución de la concentración de *sulfatos* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *siembra directa*.

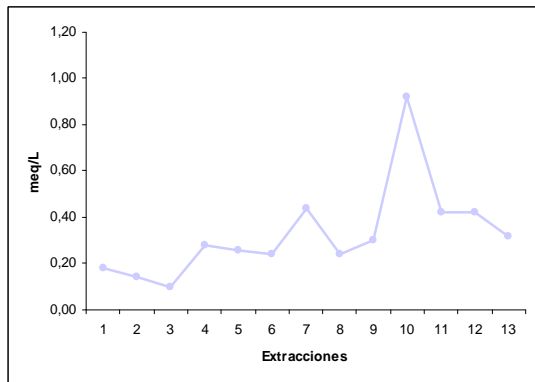


Gráf. III.124. Evolución de la concentración de *sulfatos* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *siembra directa*.

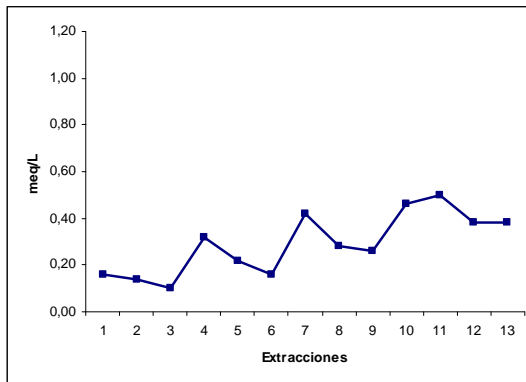
➤ *Mínimo Laboreo:* Según se aprecia en la gráf. III.125, en el horizonte superficial la concentración de sulfatos en la solución del suelo aumenta a lo largo de la experiencia. Salvo un pico más acusado que conforman las extracciones 9, 10 y 11, el aumento de concentración de sulfatos en la solución del suelo es progresivo. La concentración en la primera extracción es de 0,18 meq/L, mientras que en la última 0,32 meq/L.

En el horizonte subsuperficial la concentración de sulfatos también asciende, según la gráfica III.126. Hay que resaltar que en esta ocasión no se producen picos acusados de aumento o descenso de concentración. La concentración en la primera extracción es de 0,16 meq/L, mientras que en la última 0,38 meq/L.

Al comparar la evolución de la concentración de sulfatos en los dos horizontes de la parcela de mínimo laboreo se observa como la concentración de sulfatos es prácticamente la misma, la única salvedad ocurre en la décima extracción (gráf. III.125 y III.126).

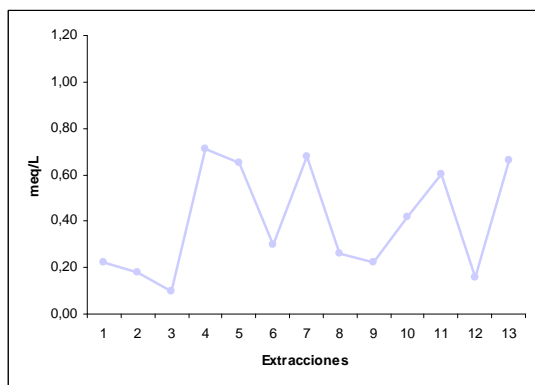


Gráf. III.125. Evolución de la concentración de *sulfatos* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *mínimo laboreo*.

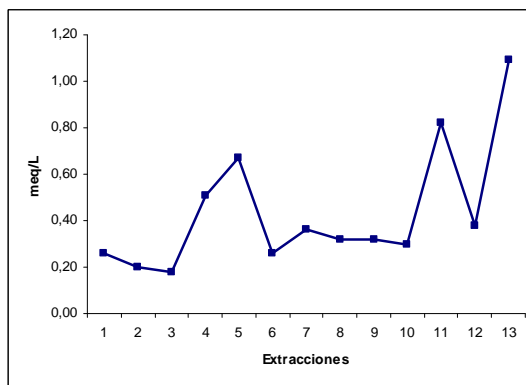


Gráf. III.126. Evolución de la concentración de *sulfatos* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *mínimo laboreo*.

➤ *Laboreo Convencional*: En las extracciones del horizonte superficial la concentración de sulfatos de los primeros muestreos es la más baja de toda la experiencia, 0,22 - 0,10 meq/L, a partir de la cuarta extracción, en la que se alcanza la concentración máxima, 0,71 meq/L, se alternan picos que originan aumentos y disminuciones en la concentración (gráf. III.127).



Gráf. III.127. Evolución de la concentración de *sulfatos* en cada una de las extracciones en el horizonte *superficial* en *laboreo convencional*.



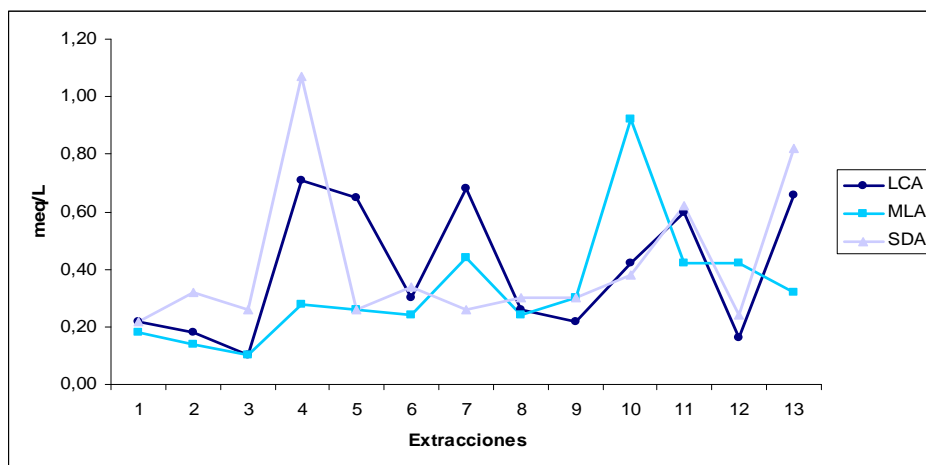
Gráf. III.128. Evolución de la concentración de *sulfatos* en cada una de las extracciones en el horizonte *subsuperficial* en *laboreo convencional*.

En la gráfica III.128 está la evolución de la concentración de sulfatos a lo largo del estudio y en ella se ve como en los primeros muestreos de la solución del horizonte subsuperficial la concentración de sulfatos alcanza los valores más bajos, 0,26 - 0,18 meq/L,

en la cuarta y quinta extracción se produce un aumento en la concentración hasta 0,67 meq/L para disminuir después hasta valores cercanos a 0,30 meq/L y permanecer el valor constante durante 5 extracciones. Al final se producen dos picos que aumentan la concentración de sulfatos en la solución hasta el valor máximo en la última extracción, éste es 1,09 meq/L.

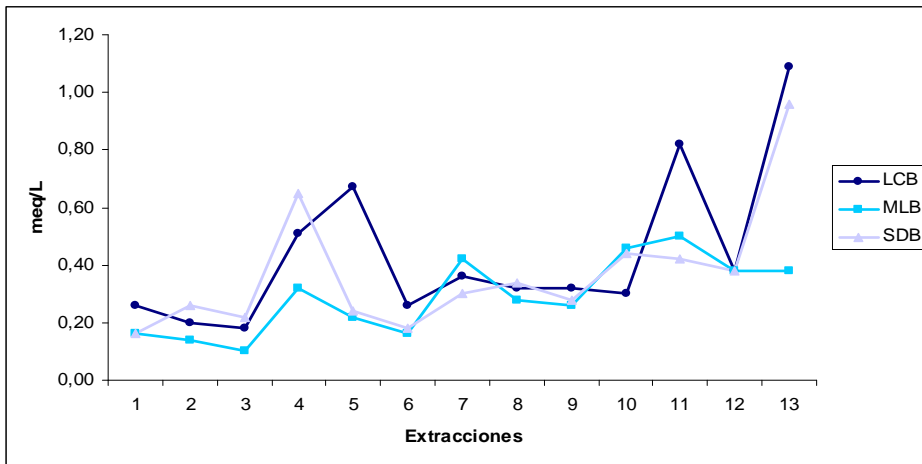
Al comparar las extracciones en superficie y en profundidad de la parcela de laboreo convencional, gráficos III.127 y III.128, se comprueba que la tendencia de la concentración de sulfatos en la solución del suelo en los dos horizontes es similar. Los aumentos y disminuciones de concentración se producen en las mismas extracciones.

➤ *Comparativa en el horizonte superficial:* En la gráfica comparativa de las tres parcelas (gráf. III.129) puede observarse como, salvo en 5 extracciones, los valores son semejantes en los tres casos. En la cuarta extracción se produce un aumento de concentración, pero mientras que éste es muy acusado en siembra directa y en laboreo convencional, en mínimo laboreo el aumento es muy leve. En la quinta extracción tanto siembra directa como mínimo laboreo vuelven a valores similares a los anteriores a la subida mientras que en laboreo convencional la bajada es paulatina y ocupa esta extracción también. En la séptima, décima y décimo tercera extracción se producen aumentos en la concentración en los tres casos, pero no son de la misma entidad en los tres sistemas.



Graf. III.129. Comparativa de evolución de la concentración de sulfatos en los tres horizontes superficiales.

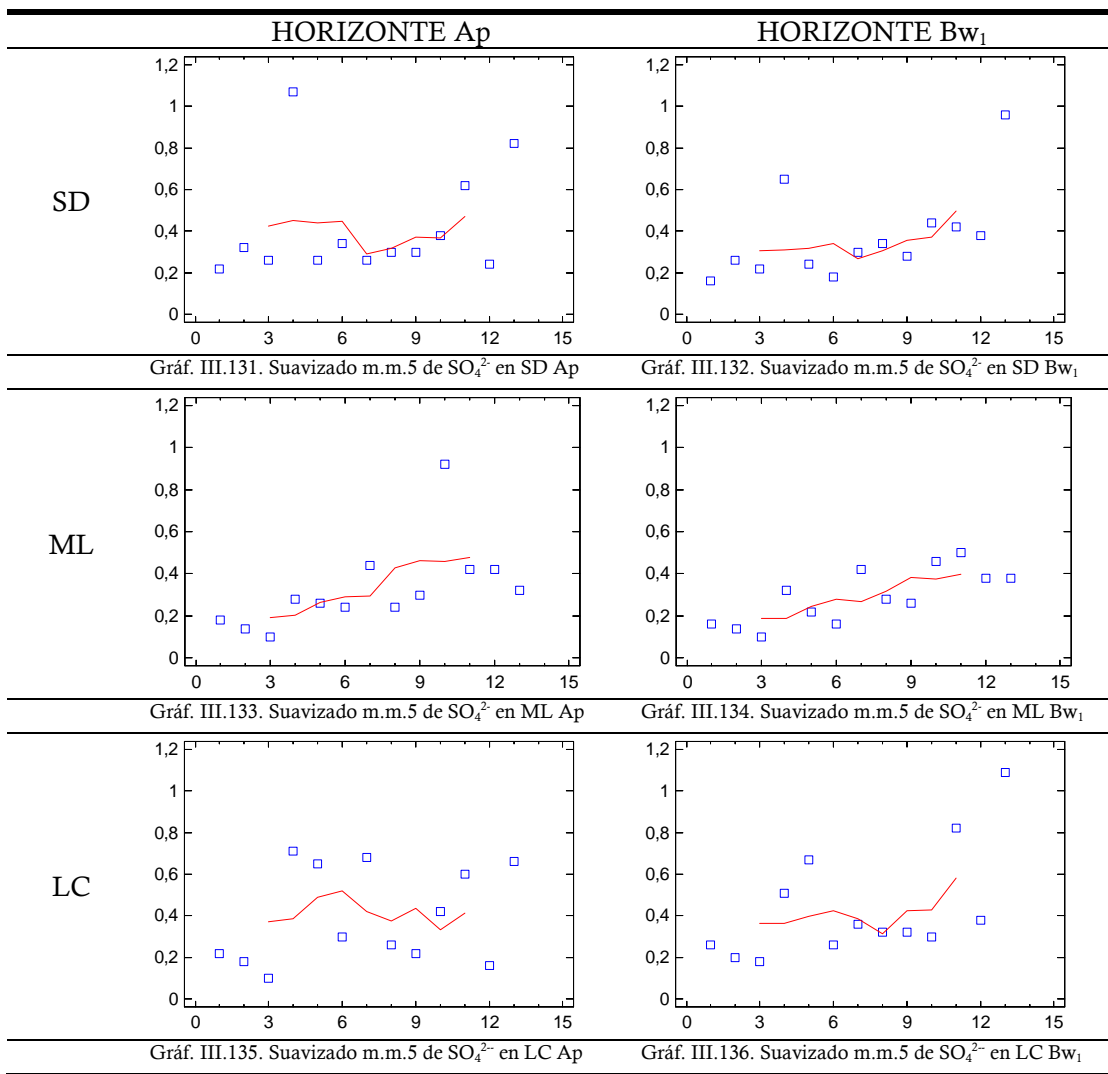
➤ *Comparativa en el horizonte subsuperficial:* Existe similitud en las tres líneas salvo en 4 extracciones en las que se producen aumentos en las concentraciones y éstos son mayores en laboreo convencional en tres de ellas, en la cuarta extracción el aumento es más elevado en siembra directa (gráf. III.130).



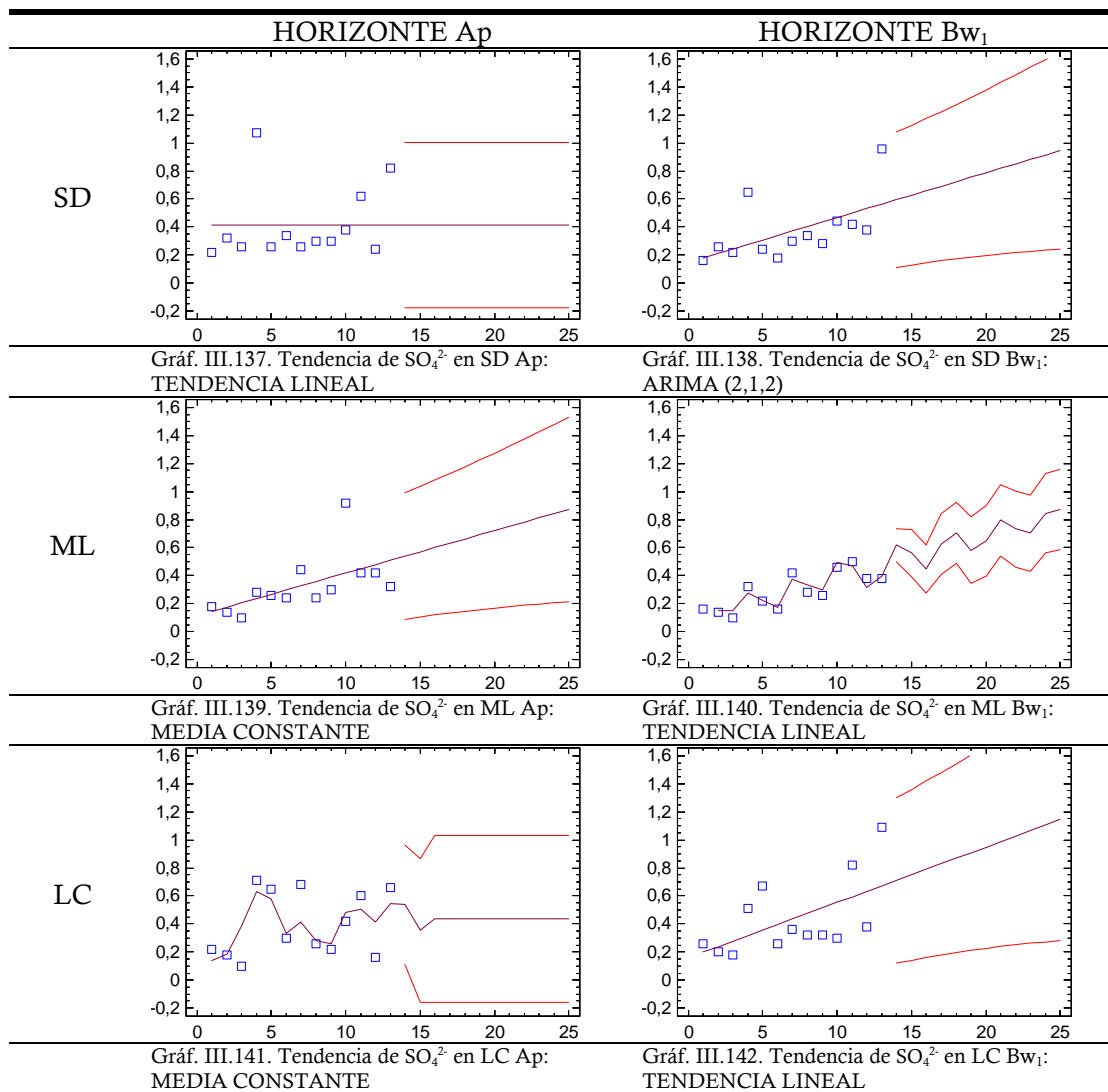
Graf. III.130. Comparativa de evolución de la concentración de sulfatos en los tres horizontes subsuperficiales.

b) *Análisis de Series Temporales.*

A partir de la suavización por medias móviles a cinco términos (gráficos desde el III.131 hasta el III.136), se deduce una leve tendencia ascendente de la concentración de sulfatos en la solución del suelo, salvo en el caso de LC Ap.



El pronóstico indica, igual que en los casos anteriores, que no es válido debido a que es posible gran cantidad de valores futuros en dicha predicción (gráf. desde III.137 hasta III.142).



Las fórmulas de las rectas de regresión para los 6 casos de la variable SO_4^{2-} son las de la tabla III.33.

	A	B
ML	$0,115385 + 0,030330 t$	$0,108462 + 0,026044 t$
SD	$0,314231 + 0,014341 t$	$0,148077 + 0,031923 t$
LC	$0,290385 + 0,015220 t$	$0,160385 + 0,039396 t$

Tabla III.33. Fórmulas de las rectas de regresión de la variable sulfatos para los 6 casos.

c) *ANOVA*.

Para el caso de la variable sulfatos, el test de Kruskal-Wallis no ha encontrado diferencia significativa de los valores medios al 95% de confianza para ninguno de los dos factores, técnica de laboreo y profundidad, estudiados.

Por tanto, no existen diferencias significativas de medias para ningún factor, lo cual indica que la concentración de sulfatos en la solución del suelo no depende ni de la técnica de cultivo ni del horizonte muestreado.

En el caso de los sulfatos ocurre de igual forma que para los bicarbonatos, no existen estudios previos que indiquen si existen diferencias según la técnica de cultivo o bien si se dan modificaciones en la concentración de sulfatos a lo largo del perfil.

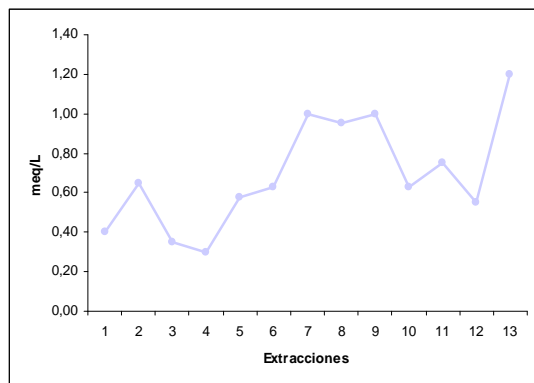
III.3.3.3. Cloruros.

a) Evolución de la concentración de cloruros en la solución del suelo.

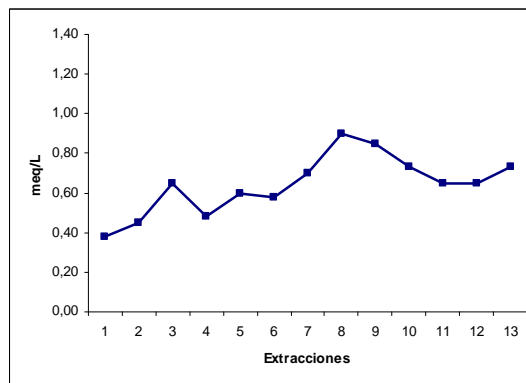
➤ **Siembra Directa:** Desde el inicio hasta el final del estudio la concentración de cloruros en la solución del horizonte superficial aumenta desde 0,40 meq/L hasta 1,20 meq/L. Aunque el aumento en la concentración es irregular presentando a lo largo de la experiencia aumentos y descensos, según queda representado en la gráfica III.143.

En la solución extraída del horizonte subsuperficial la concentración de partida es 0,38 meq/L y la final 0,73 meq/L. Aunque hay que resaltar que el aumento progresivo en la concentración se produce hasta la octava extracción, después hay un ligero descenso, si bien finalmente asciende de nuevo (gráf. III.144).

Cuando se estudia el perfil completo de la parcela de siembra directa, comparando los gráficos III.143 y III.144, se observa como la evolución de la concentración de cloruros en el horizonte subsuperficial es más regular y en ella los aumentos y disminuciones de concentración son más paulatinos, presentando la solución superficial picos más acusados y tendencia más irregular.



Gráf. III.143. Evolución de la concentración de **cloruros** en cada una de las extracciones en el horizonte **superficial** en **siembra directa**.



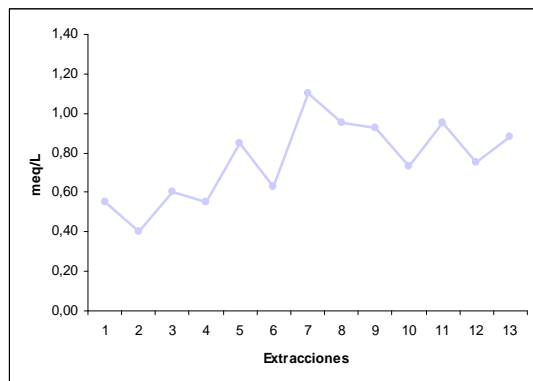
Gráf. III.144. Evolución de la concentración de **cloruros** en cada una de las extracciones en el horizonte **subsuperficial** en **siembra directa**.

➤ **Mínimo Laboreo:** Como se ve en el gráfico III.145, desde el inicio al final del estudio, la solución del suelo extraída del horizonte superficial de mínimo laboreo gana en cuanto a concentración de cloruros, en la primera extracción era de 0,55 meq/L y en la última (0,88 meq/L). Si bien hay que aclarar que este aumento está marcado por picos de aumento y disminución de concentración, de hecho, el valor máximo (1,10 meq/L) se alcanza en la mitad del estudio.

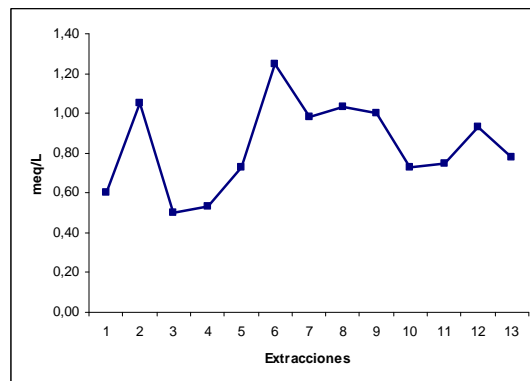
La gráfica III.146 muestra que en la solución del suelo del horizonte subsuperficial se producen irregularidades muy marcadas, picos de aumento y posterior descenso de

concentración de cloruros muy acusados en las extracciones segunda y sexta. Los valores oscilan entre 9,5 y 1,25 meq/L.

Al estudiar el perfil completo (gráf. III.145 y III.146) de mínimo laboreo se ve que la tendencia de cloruros en los dos horizontes es similar. Si bien, hay que notar que en el horizonte subsuperficial los picos son más acusados.

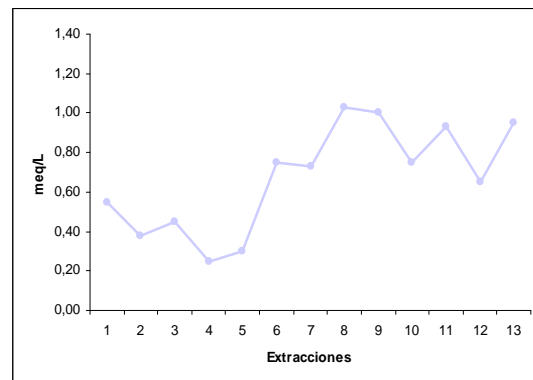


Gráf. III.145. Evolución de la concentración de **cloruros** en cada una de las extracciones en el horizonte **superficial** en **mínimo laboreo**.

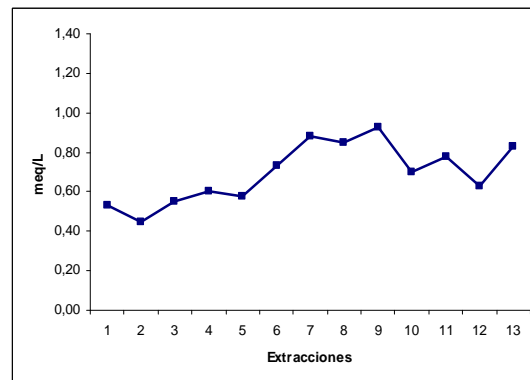


Gráf. III.146. Evolución de la concentración de **cloruros** en cada una de las extracciones en el horizonte **subsuperficial** en **mínimo laboreo**.

➤ **Laboreo Convencional:** En general, a lo largo de la experiencia, se produce un enriquecimiento en cloruros en superficie, la concentración de partida es 0,55 meq/L y la final 0,95 meq/L. Aunque hay que resaltar la tendencia descendente en las primeras extracciones y los picos de subida y bajada en el final en torno a una concentración media de 0,90 meq/L (gráf. III.147).



Gráf. III.147. Evolución de la concentración de **cloruros** en cada una de las extracciones en el horizonte **superficial** en **laboreo convencional**.

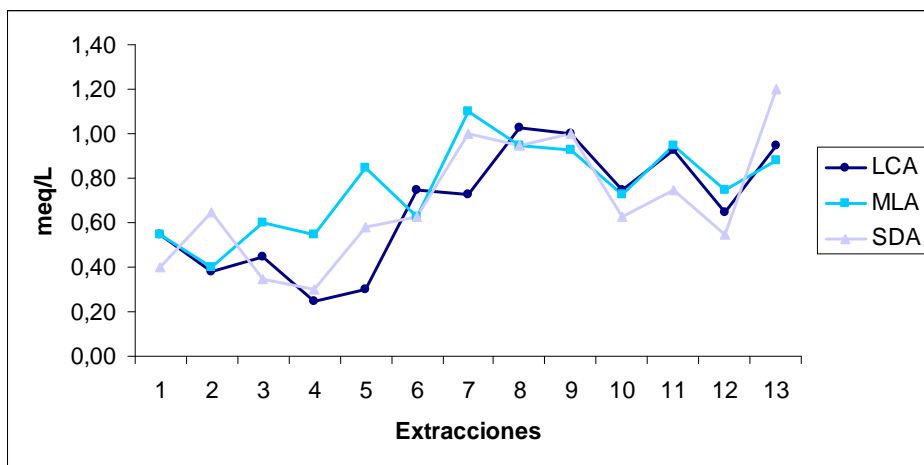


Gráf. III.148. Evolución de la concentración de **cloruros** en cada una de las extracciones en el horizonte **subsuperficial** en **laboreo convencional**.

En profundidad también se produce un enriquecimiento paulatino en cloruros, tal y como se ve en la gráfica III.148. La concentración de partida es 0,53 meq/L y la final 0,83 meq/L. Aunque a partir de la novena extracción hay un ligero descenso, si bien finalmente la tendencia es ascendente de nuevo.

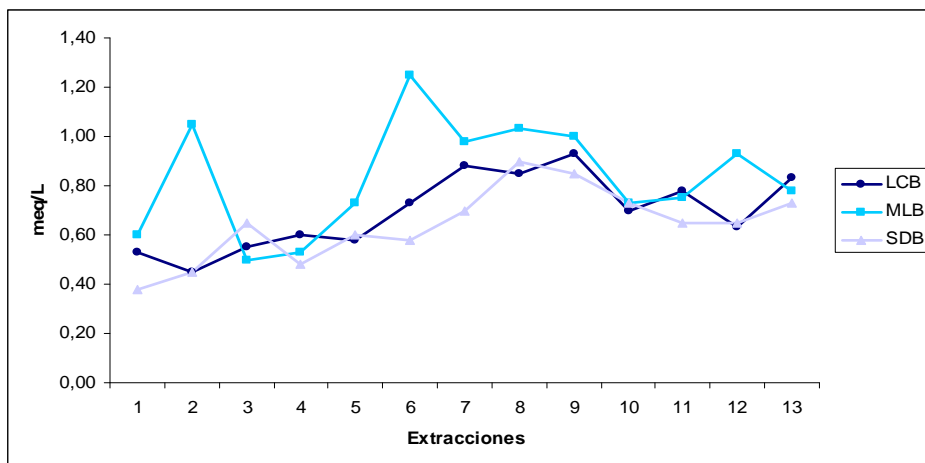
Cuando se estudia el perfil completo se observa como la evolución de la concentración de cloruros es similar. Si bien, hay que notar que hasta la mitad de la experiencia la solución más profunda es más rica en cloruros, invirtiéndose esta circunstancia a partir de la octava extracción (gráf. III.147 y III.148).

➤ *Comparativa en el horizonte superficial:* En la gráfica III.149 se comprueba que la tendencia seguida es similar, existe una superposición bastante clara de las tres líneas.



Graf. III.149. Comparativa de evolución de la concentración de cloruros en los tres horizontes superficiales.

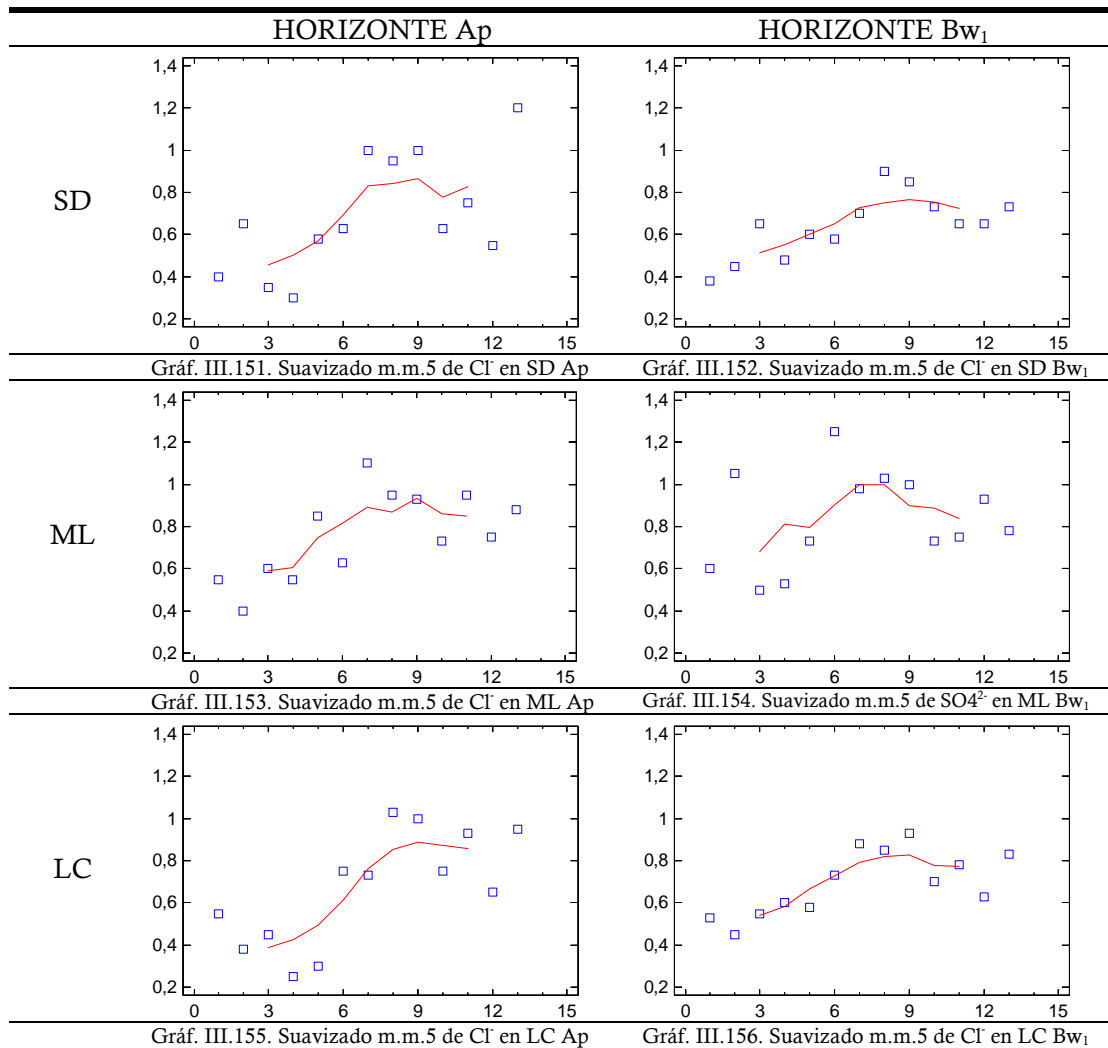
➤ *Comparativa en el horizonte subsuperficial:* En profundidad se comprueba que la tendencia seguida es similar, salvo en tres ocasiones (extracciones segunda, sexta y décimo segunda) en las que la solución de mínimo laboreo sufre un enriquecimiento acusado (ver gráfico III.150).



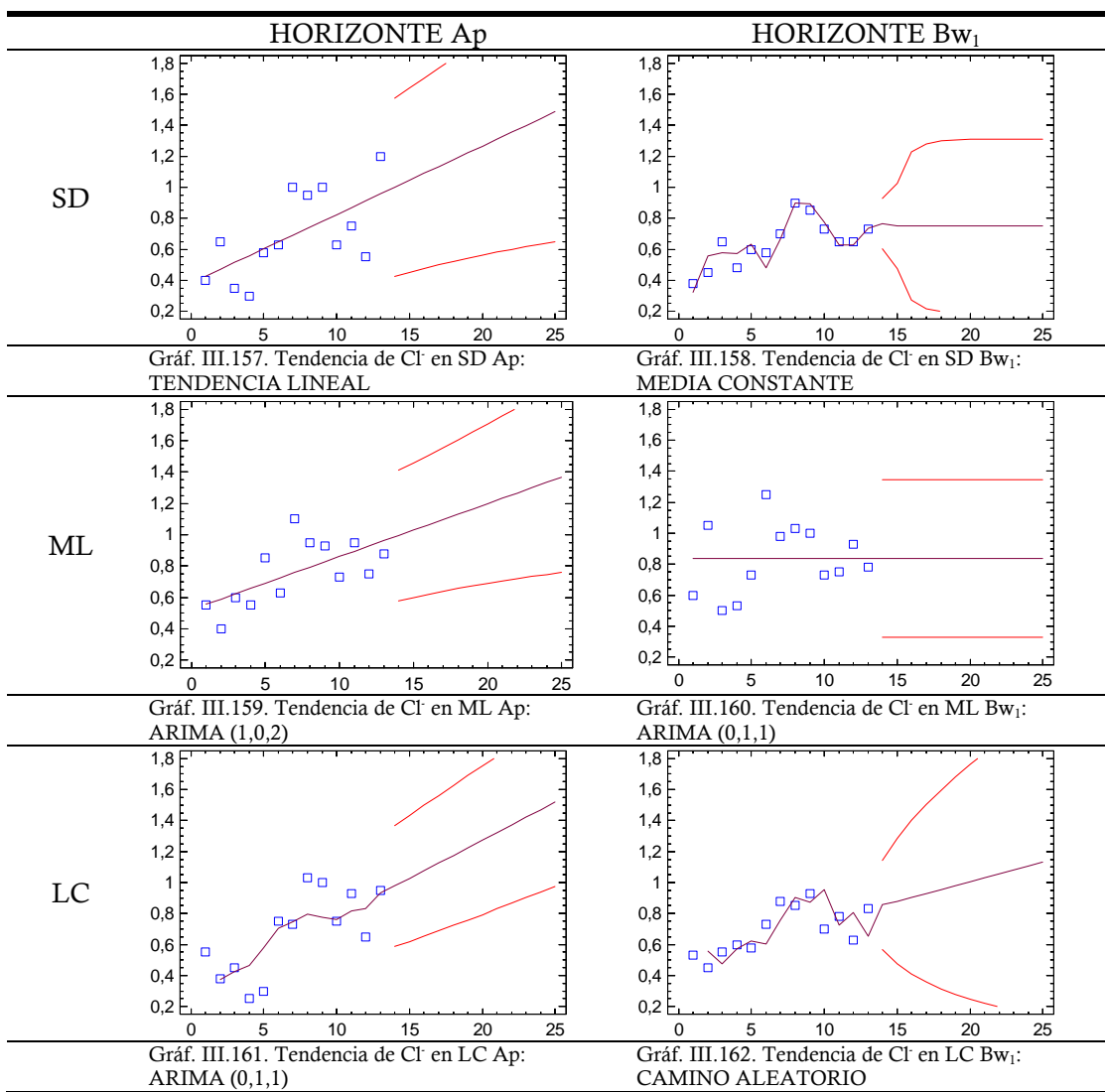
Graf. III.150. Comparativa de evolución de la concentración de cloruros en los tres horizontes subsuperficiales.

b) *Análisis de Series Temporales.*

A partir de la suavización mediante medias móviles a cinco términos, visualmente no queda clara la tendencia en ningún caso, según se observa en los gráficos del III.151 al III.156.



Tampoco es fiable el pronóstico según el criterio Akaike, igual que pasaba en los casos anteriores (gráf. III.157-III.162).



En la tabla III.34 están las fórmulas de las rectas de regresión para los 6 casos de la variable Cl⁻.

	A	B
ML	0,522692 + 0,033791 t	0,743077 + 0,013187 t
SD	0,381923 + 0,044231 t	0,462692 + 0,025659 t
LC	0,330385 + 0,048626 t	0,513077 + 0,026044 t

Tabla III.34. Fórmulas de las rectas de regresión de la variable cloruros para los 6 casos.

c) *ANOVA.*

Al estudiar la dependencia de la variable cloruros con respecto a la técnica de cultivo y a la profundidad de muestro, el test de Kruskal-Wallis no encuentra diferencia significativa de los valores medios al 95% de confianza para ninguno de los dos factores estudiados.

Por tanto, no existen diferencias significativas de medias para ningún factor y en consecuencia ninguno de los dos factores afecta a esta variable.

De igual manera que en los aniones anteriormente estudiados, no existen referencias bibliográficas que muestren dependencia o no de la concentración de cloruros en función de la técnica de cultivo o de la profundidad de muestreo.

III.3.3.4. Comparativa de aniones.

En el caso de los sulfatos y de los cloruros el ANOVA demuestra que la concentración de estos aniones en la solución del suelo no depende de la técnica de laboreo utilizada. En el caso de los bicarbonatos sí existe esta dependencia y es el mínimo laboreo quién más libera a la solución del suelo, siembra directa y laboreo convencional liberan de igual modo.

La concentración de aniones en la solución del suelo en ningún caso está determinada por la profundidad de extracción de la muestra.

III.4. Resultados del análisis de metales pesados.

La concentración de Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn fue 0 en todas las muestras de solución del suelo extraídas, tanto en superficie como en profundidad en las tres técnicas de cultivo estudiadas.

Sin embargo, no ocurrió del mismo modo con el Hg y el As. En las dos primeras extracciones sí se produjo lavado de mercurio excepto en la muestra de solución del suelo superficial de siembra directa. En el caso del arsénico se produjo lavado también en las dos primeras extracciones en todos los casos. En el resto de las extracciones no ocurrió lavado para ninguno de los dos metales pesados, esto es debido a que el tiempo de equilibrio de la solución interna del suelo con la solución externa es mayor que el de este estudio y por tanto ese equilibrio no volvió a establecerse.

En la tabla III.35 y III.36 están los valores de concentración (mg/L) encontrados para estos dos metales pesados en las diferentes muestras de solución del suelo.

MUESTRA	1ª extracción	2ª extracción	Resto de extracciones
SD (Ap)	0	0	0
SD (Bw ₁)	0	0,5	0
ML (Ap)	0	0	0
ML (Bw ₁)	0,7	0	0
LC (Ap)	0,6	0	0
LC (Bw ₁)	0,6	0	0

Tabla III.35. Concentración de Hg (mg/L) en las 13 extracciones de todas las muestras.

MUESTRA	1ª extracción	2ª extracción	Resto de extracciones
SD (Ap)	0,3	0	0
SD (Bw ₁)	0	0,3	0
ML (Ap)	1,1	0,9	0
ML (Bw ₁)	0	0	0
LC (Ap)	1,7	1,6	0
LC (Bw ₁)	0,1	0,1	0

Tabla III.36. Concentración de As (mg/L) en las 13 extracciones de todas las muestras.

IV. CONCLUSIONES

IV. CONCLUSIONES.

- 1^a. Los suelos donde se ha realizado la experimentación se clasifican como Vertisoles Cálcidos (Topolitomorfos):
 - a. Con respecto a las tres técnicas de cultivo, no presentan diferencias significativas en lo que respecta a: textura, conductividad, densidad aparente, pF, pH y microelementos. Si existen diferencias en cuanto a contenido en carbonatos, materia orgánica, macroelementos cambiables, fósforo y macroelementos asimilables.
 - b. La difracción de rayos X permite afirmar que todas las muestras tienen una composición cualitativa similar con respecto a las arcillas, identificándose esmectitas, caolinita, illita-mica, cuarzo y trazas de clorita. No existiendo variación significativa de las mismas en los horizontes Bw_1 , Bw_{2k} y Ck ni en el Ap con respecto a la mica. Se producen ligeras variaciones en el horizonte superficial con respecto a esmectitas, illita y cuarzo, siendo estas diferencias más significativas en la caolinita y la calcita.
- 2^a. El diseño experimental para la toma de muestras inalteradas de suelo, así como, el de uso de sondas extractoras de teflón-cuarzo y el de secuenciación temporal del muestreo se han validado científicamente tras las repeticiones realizadas en el aporte de agua, movimiento de agua, proceso de extracción y toma de muestras. Por lo que consideramos científicamente probado que este método que establecemos puede ser adoptado para suelos arcillosos en general.
- 3^a. La saturación del medio (mediad con el TDR) para las tres técnicas de cultivo (siembra directa, mínimo laboreo y laboreo convencional) se ha establecido con una humedad volumétrica del 49%.
- 4^a. Debido a que, según muestra el Análisis de las Series Temporales, las variables estudiadas muestran una ausencia de tendencia, esto es, las variables poseen un comportamiento aleatorio que puede asimilarse a una variable normal, es posible realizar el análisis de la varianza de cada una de ellas. Se observa que todas las variables excepto, Na^+ , K^+ y SO_4^{2-} dan positivo en algunos de los test habituales de normalidad y que incluso Na^+ y K^+ ofrece datos de simetría y Kurtosis similares a los admisibles para una variable normal.
- 5^a. **Del análisis de la varianza se desprende** la existencia de grupos homogéneos en cuanto a comportamiento, esto es:
 - a. El contenido en sodio aumenta con la profundidad en las tres técnicas de cultivo. Siendo el laboreo convencional el que libera más sodio a la solución

del suelo, por tanto produce más salinización que los métodos conservacionistas.

- b. El laboreo convencional es el que más potasio libera a la solución del suelo, seguido de mínimo laboreo, siendo la siembra directa la que menos. El contenido de potasio en la solución del suelo disminuye con la profundidad en las tres técnicas de cultivo.
- c. En el suelo hay exceso de calcio por lo que las cantidades en la solución del suelo son prácticamente iguales, sea cual sea la técnica de cultivo.
- d. La solución del suelo de mínimo laboreo es la más rica en magnesio seguida de siembra directa, siendo el laboreo convencional la técnica que menos magnesio libera a la solución del suelo. La liberación, en las tres técnicas, está marcada por unos picos de aumentos y disminuciones. Dichos picos coinciden en las mismas extracciones para los tres casos, lo cual indica el período de tiempo que necesitan la solución interna y la solución externa del suelo para recuperar el equilibrio. El contenido en magnesio en la solución del suelo no está influenciado por la profundidad de extracción de la muestra.
- e. En los aniones la profundidad de extracción no influye en la concentración de los mismos en la solución del suelo.
- f. El mínimo laboreo es la técnica que más bicarbonatos libera a la solución del suelo. Siendo la concentración de los mismos igual en siembra directa y en laboreo convencional. En todos los casos se ve un ligero empobrecimiento en bicarbonatos con ciertas irregularidades.
- g. En el caso de los sulfatos y de los cloruros, su concentración en la solución del suelo no depende de la técnica de laboreo utilizada, ni como se ha mencionado anteriormente de la profundidad de muestreo.
- h. De los metales pesados analizados en la solución del suelo sólo se determinaron mercurio y arsénico, aunque sólo en las primeras extracciones debido a que el tiempo de equilibrio de la solución interna del suelo con la solución externa es mayor que el de este estudio y por tanto ese equilibrio no volvió a establecerse.

V. ANEXOS

VII. ANEXOS.

Anexo I. Ficha de descripción del perfil de siembra directa.

Referencia				Perfil		
TESIS BEATRIZ					SD	
Serie	Huso	X	Y	Sistema de clasificación		
	30S	270630	4142526	10		
LOCALIZACIÓN						
FINCA EXPERIMENTAL TOMEJIL						
CLASIFICACIÓN						
VERTISOL CÁLCICO. 35-23						
OBSERVADOR						
B. LOZANO, L. PARRAS, J. L. MURIEL						
Fecha	Elevación	Pendiente	Relieve	Erosión		
1/4/05	78		1	1		
Drenaje	Pedregosidad					
2	Frecuencia	Naturaleza litológica		Tamaño		
	5	-		-		
	Rocosidad					
	Rocosidad	Naturaleza litológica		Dureza		
	6	-		-		
	Material original					
	Material original	Período geológico	Posición fisiográfica			
	57	6	7			
	Uso actual	Nº de horizontes	Profundidad			
	49	4	180			
Observaciones						

Estudio del comportamiento hídrico en ZNS de un Vertisol del Valle Medio del Guadalquivir

Beatriz Lozano García

PERFIL	TR-BR	1	TR-BR	2	TR-BR	3	TR-BR	4
Orden								
Discontinuidad								
Horizonte		2		9		9		14
Subíndices	9		19	26-12	19	27-12	12	
Límite superior		0		24		64		140
Límite inferior		24		64		140		180
<u>Color Munsell</u>								
En seco		115		115		114		126
En húmedo		115		115		115		127
<u>Textura</u>		12		12		12		12
<u>Estructura</u>								
Tipo		4		4		3/1		-
Clase		2				3		-
Grado		3		3		3		-
<u>Consistencia</u>								
Plasticidad		4		4		4		4
Adhesividad		4				4		4
En húmedo		4		4		4		4
En seco		4		4		4		4
<u>Cementación</u>								
		4		4		4		4
<u>Pedregosidad</u>								
Frecuencia		5		5		5		5
Naturaleza		-		-		-		-
Tamaño		-		-		-		-
<u>Porosidad</u>								
Frecuencia		2/3		3		3		3
Tamaño		4		4		1		1
<u>Raíces</u>								
Frecuencia		3		1		4		4
Tamaño		4		1		-		-
<u>Reacción</u>								
		3		3		4		4
<u>Nódulos</u>								
Frecuencia		4		1		3		3
Naturaleza		-		1		1		1
<u>Revestimientos</u>								
Frecuencia		4		2		2		4
Clase		-		1		1		-
<u>Límite</u>								
Clase		3		3		1		
Forma		1		1		1		

Anexo II. Ficha de descripción del perfil de mínimo laboreo.

Referencia				Perfil		
TESIS BEATRIZ					ML	
Serie	Huso	X	Y	Sistema de clasificación		
	30S	270622	4142525	10		
LOCALIZACIÓN						
FINCA EXPERIMENTAL TOMEJIL						
CLASIFICACIÓN						
VERTISOL CÁLCICO. 35-23						
OBSERVADOR						
B. LOZANO, L. PARRAS, J. L. MURIEL						
Fecha	Elevación	Pendiente	Relieve	Erosión		
1/4/05	78		1	1		
Drenaje	Pedregosidad					
2	Frecuencia	Naturaleza litológica		Tamaño		
	5	-		-		
	Roccosidad					
	Roccosidad	Naturaleza litológica		Dureza		
	6	-		-		
	Material original					
	Material original	Período geológico	Posición fisiográfica			
	57	6	7			
	Uso actual	Nº de horizontes	Profundidad			
	49	4	180			
Observaciones						

Estudio del comportamiento hídrico en ZNS de un Vertisol del Valle Medio del Guadalquivir

Beatriz Lozano García

PERFIL	TR-MI	1	TE-MI	2	TE-MI	3	TE-MI	4
Orden								
Discontinuidad								
Horizonte		2		9		9		14
Subíndices	9		19	28-12	19	27-12	12	
Límite superior		0		24		64		140
Límite inferior		24		64		140		180
<u>Color Munsell</u>								
En seco		115		115		114		125
En húmedo		115		115		115		127
<u>Textura</u>		12		12		12		12
<u>Estructura</u>								
Tipo		4		4		3/1		-
Clase		2				3		-
Grado		3		3		3		-
<u>Consistencia</u>								
Plasticidad		4		4		4		4
Adhesividad		4				4		4
En húmedo		4		4		4		4
En seco		4		4		4		4
<u>Cementación</u>								
		4		4		4		4
<u>Pedregosidad</u>								
Frecuencia		5		5		5		5
Naturaleza		-		-		-		-
Tamaño		-		-		-		-
<u>Porosidad</u>								
Frecuencia		2/3		3		3		3
Tamaño		4		4		1		1
<u>Raíces</u>								
Frecuencia		3		1		4		4
Tamaño		4		1		-		-
<u>Reacción</u>								
		3		3		4		4
<u>Nódulos</u>								
Frecuencia		4		1		3		3
Naturaleza		-		1		1		1
<u>Revestimientos</u>								
Frecuencia		4		2		2		4
Clase		-		1		1		-
<u>Límite</u>								
Clase		3		3		1		
Forma		1		1		1		

Anexo III. Ficha de descripción del perfil de laboreo convencional.

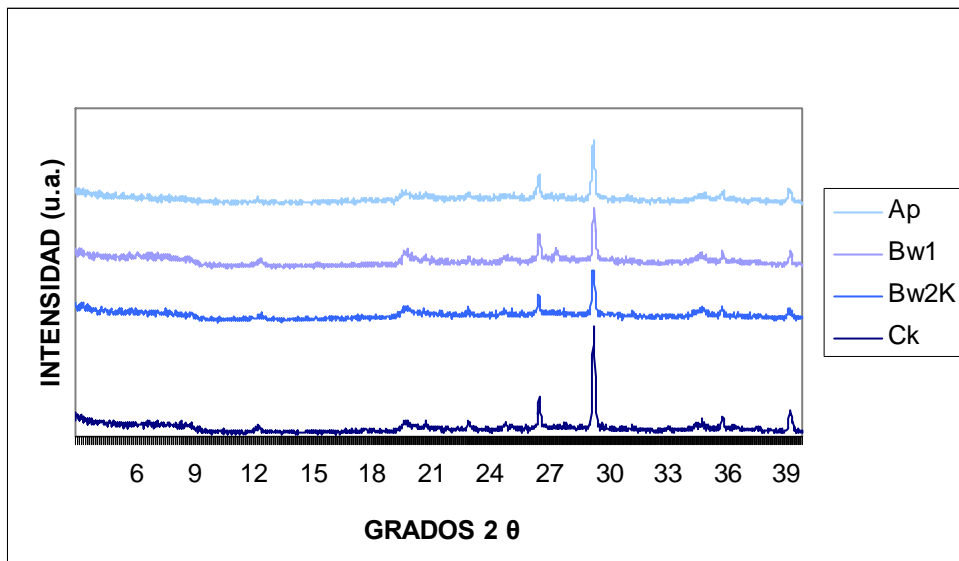
Referencia				Perfil		
TESIS BEATRIZ					LC	
Serie	Huso	X	Y	Sistema de clasificación		
	30S	270619	4142523	10		
LOCALIZACIÓN						
FINCA EXPERIMENTAL TOMEJIL						
CLASIFICACIÓN						
VERTISOL CÁLCICO. 35-23						
OBSERVADOR						
B. LOZANO, L. PARRAS, J. L. MURIEL						
Fecha	Elevación	Pendiente	Relieve	Erosión		
1/405	78		1	1		
Drenaje	Pedregosidad					
2	Frecuencia	Naturaleza litológica		Tamaño		
	5	-		-		
	Rocidad					
	Rocidad	Naturaleza litológica		Dureza		
	6	-		-		
	Material original					
	Material original	Período geológico	Posición fisiográfica			
	57	6	7			
	Uso actual	Nº de horizontes	Profundidad			
	49	4	180			
Observaciones						

Estudio del comportamiento hídrico en ZNS de un Vertisol del Valle Medio del Guadalquivir

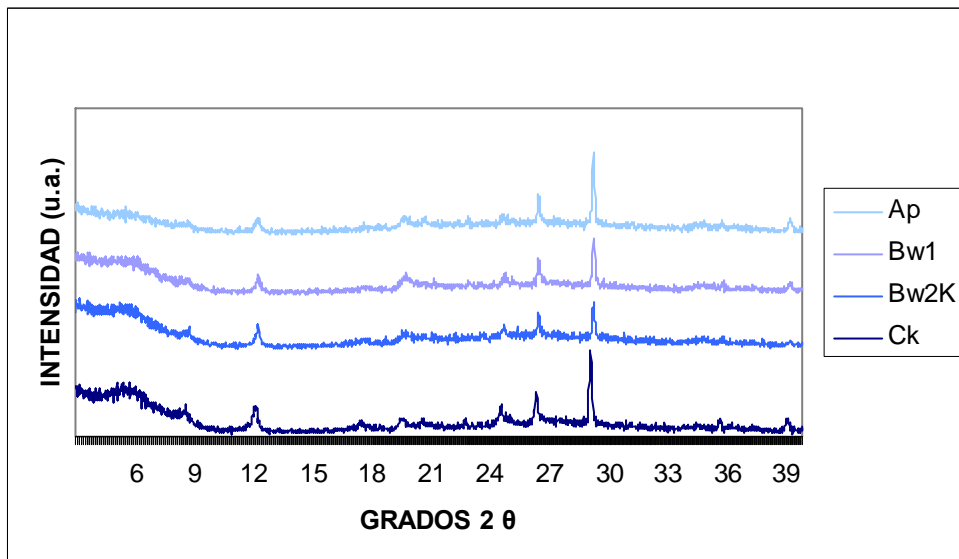
Beatriz Lozano García

PERFIL	TR-LC	1	TR-LC	2	TR-LC	3	TR-LC	4
Orden								
Discontinuidad								
Horizonte		2		9		9		14
Subíndices	9		19	26-12	19	27-12	12	
Límite superior		0		40		64		140
Límite inferior		40		64		140		180
<u>Color Munsell</u>								
En seco		115		115		114		126
En húmedo		115		115		115		127
<u>Textura</u>		12		12		12		12
<u>Estructura</u>								
Tipo		4		4		3/1		-
Clase		2				3		-
Grado		3		3		3		-
<u>Consistencia</u>								
Plasticidad		4		4		4		4
Adhesividad		4				4		4
En húmedo		4		4		4		4
En seco		4		4		4		4
<u>Cementación</u>		4		4		4		4
<u>Pedregosidad</u>								
Frecuencia		5		5		5		5
Naturaleza		-		-		-		-
Tamaño		-		-		-		-
<u>Porosidad</u>								
Frecuencia	GRANDES			3		3		3
Tamaño	GRIETAS			4		1		1
<u>Raíces</u>								
Frecuencia		2		1		4		4
Tamaño		2		1		-		-
<u>Reacción</u>		4		3		4		4
<u>Nódulos</u>								
Frecuencia		4		1		3		3
Naturaleza		-		1		1		1
<u>Revestimientos</u>								
Frecuencia		4		2		2		4
Clase		-		1		1		-
<u>Límite</u>								
Clase		1		3		1		
Forma		1		1		1		

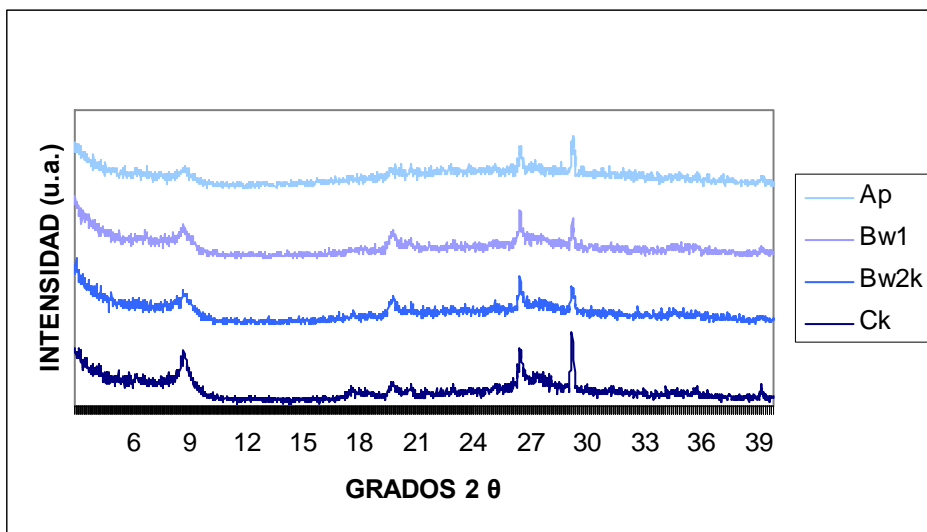
Anexo IV. Difractogramas de siembra directa.



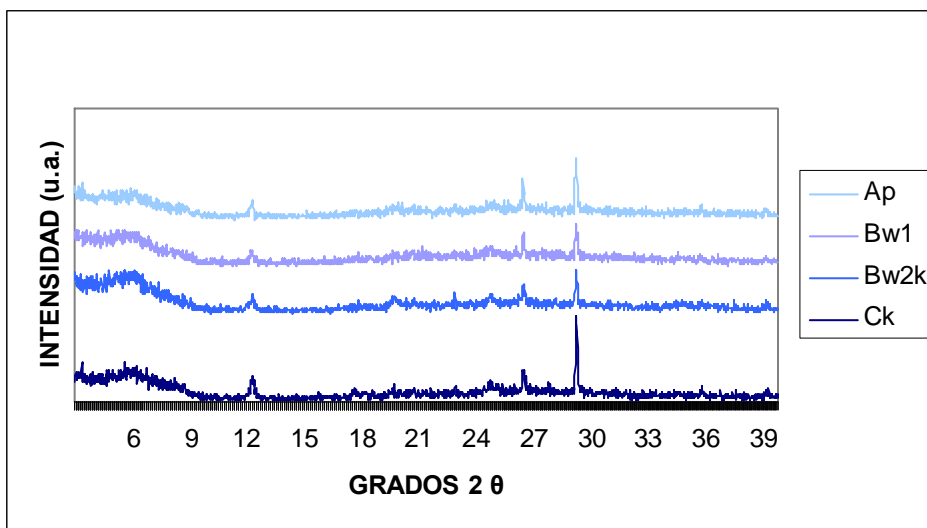
Gráf. VII.1. Difractograma de las muestras tamizadas del perfil de siembra directa



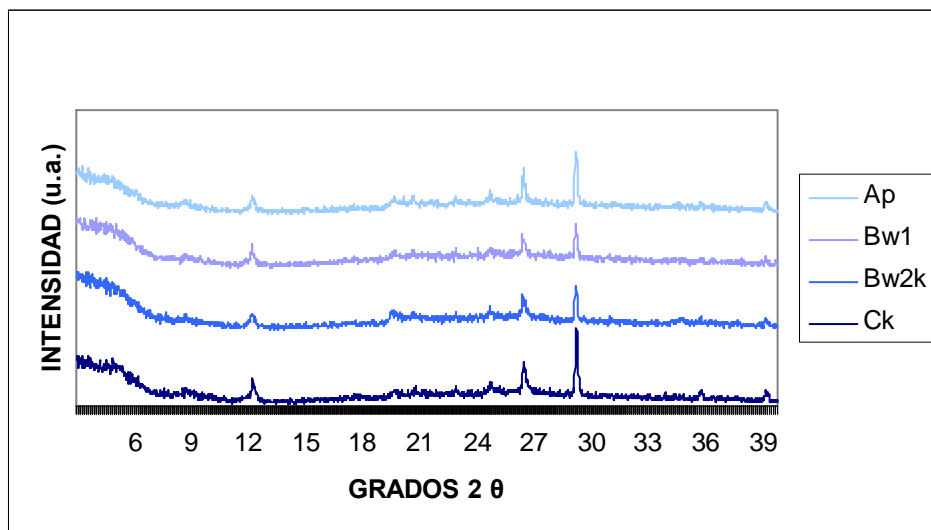
Gráf. VII.2. Difractograma de las muestras tratadas con KCl (1M) del perfil de siembra directa



Gráf. VII.3. Difractograma de las muestras tratadas con KCl (1M) y calentadas a 550°C del perfil de siembra directa

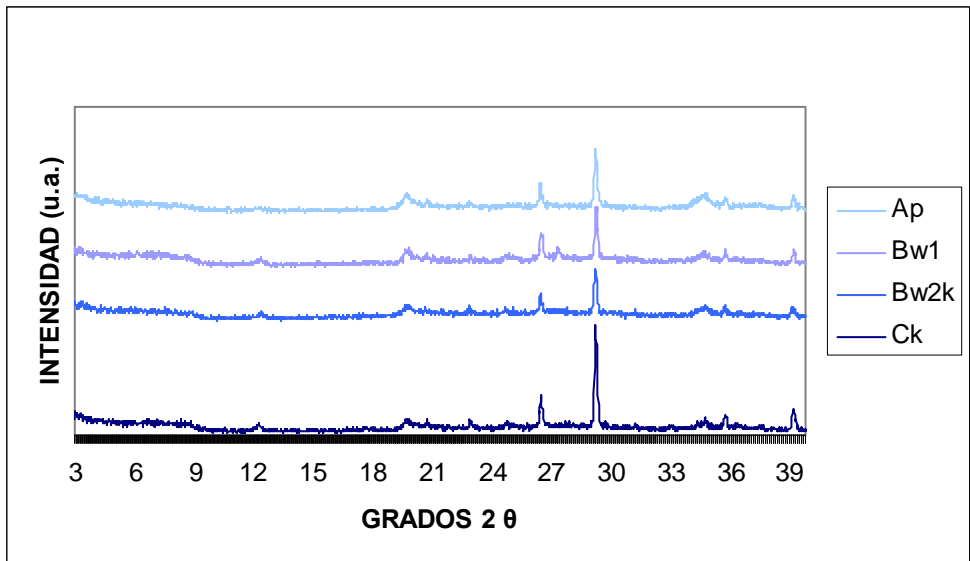


Gráf. VII.4. Difractograma de las muestras tratadas con MgCl₂ (1M) del perfil de siembra directa

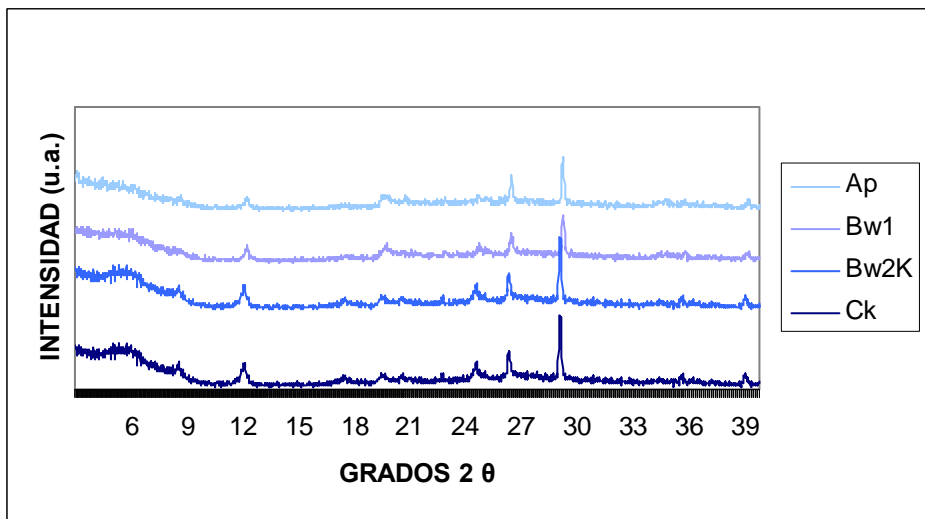


Gráf. VII.5. Difractograma de las muestras tratadas con MgCl_2 (1M) y sometidas posteriormente a atmósfera saturada en etilenglicol del perfil de siembra directa

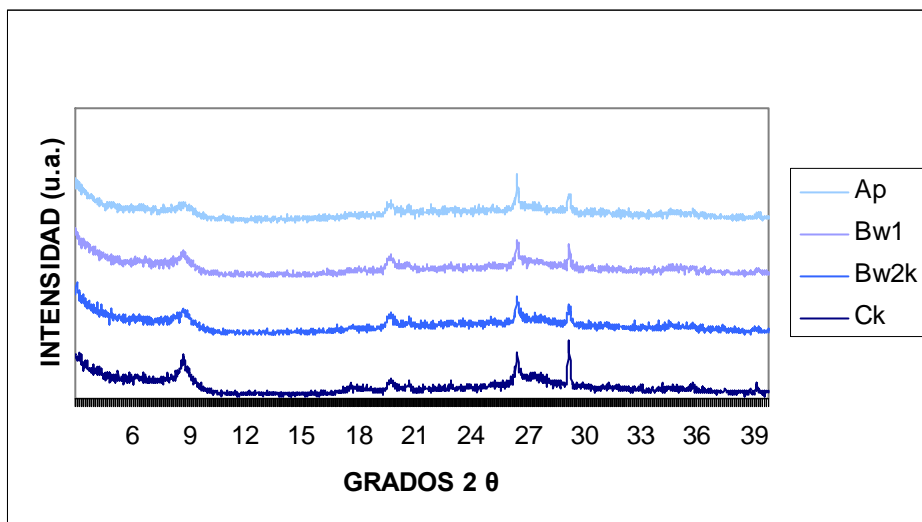
Anexo V. Difractogramas de mínimo laboreo.



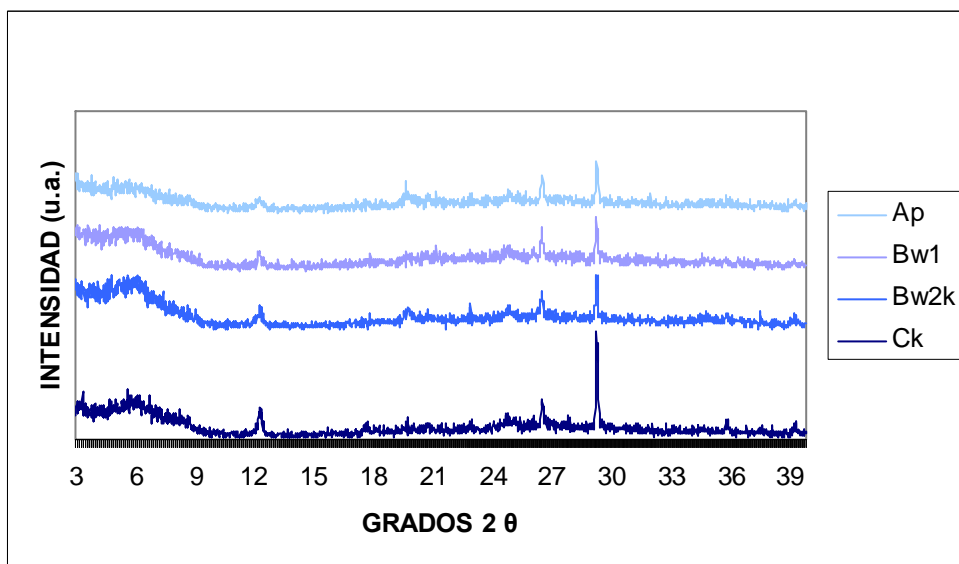
Gráf. VII.6. Difractograma de las muestras tamizadas del perfil de mínimo laboreo



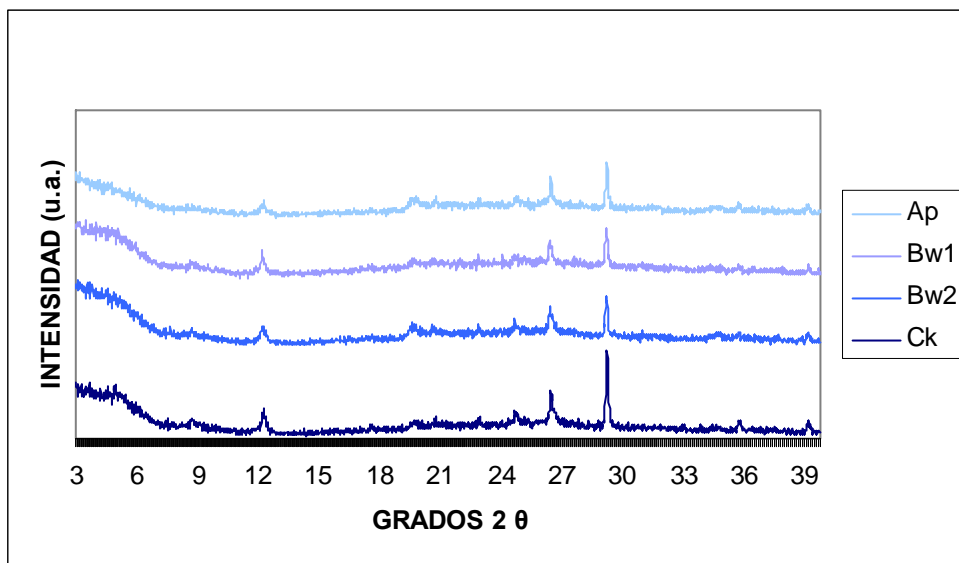
Gráf. VII.7. Difractograma de las muestras tratadas con KCl (1M) del perfil de mínimo laboreo



Gráf. VII.8. Difractograma de las muestras tratadas con KCl (1M) y calentadas posteriormente a 550°C del perfil de mínimo laboreo

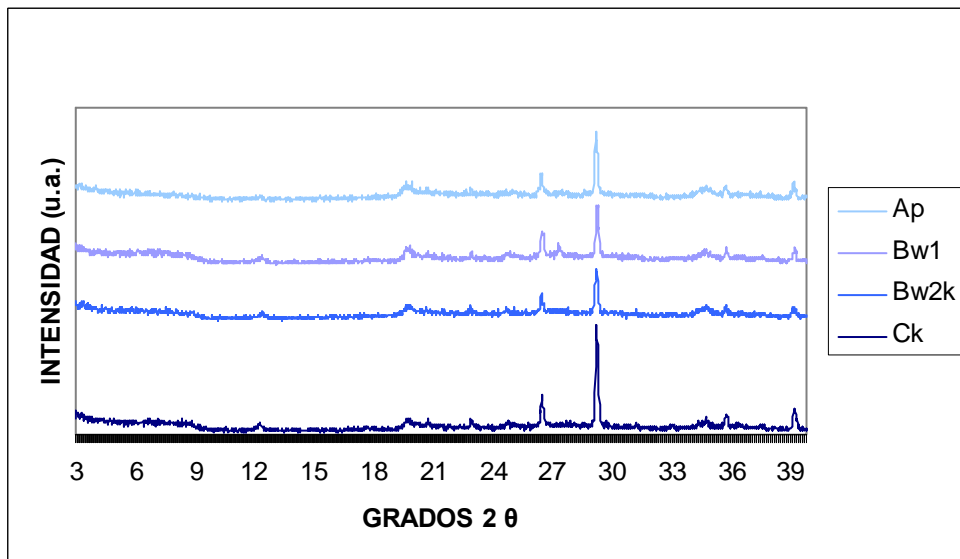


Gráf. VII.9. Difractograma de las muestras tratadas con MgCl₂ (1M) del perfil de mínimo laboreo

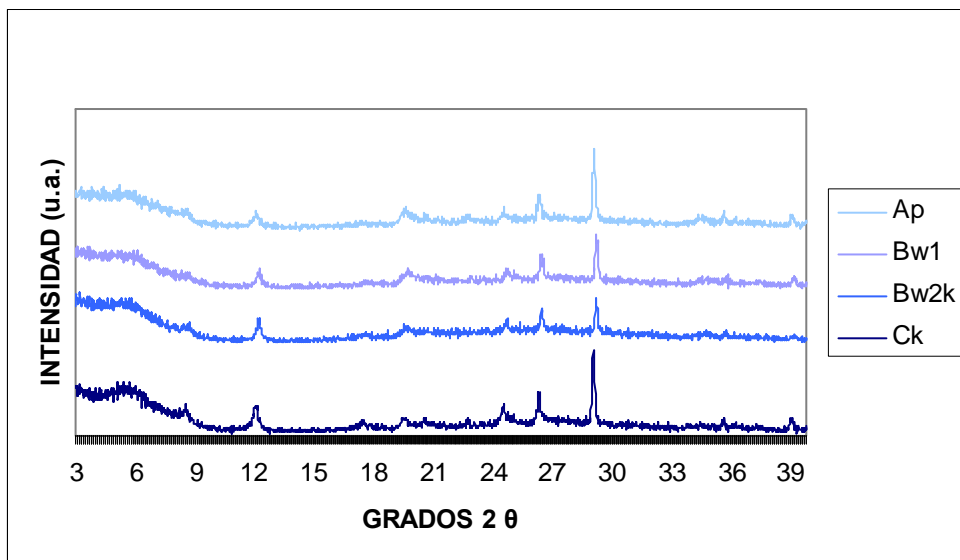


Gráf. VII.10. Difractograma de las muestras tratadas con $MgCl_2$ (1M) y sometidas posteriormente a atmósfera saturada en etilenglicol del perfil de mínimo laboreo

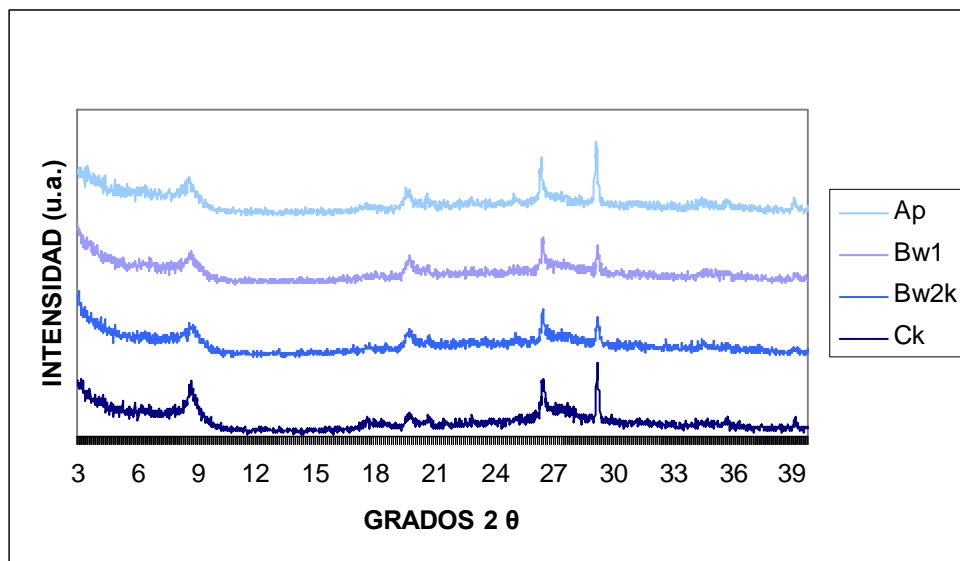
Anexo VI. Difractogramas de laboreo convencional.



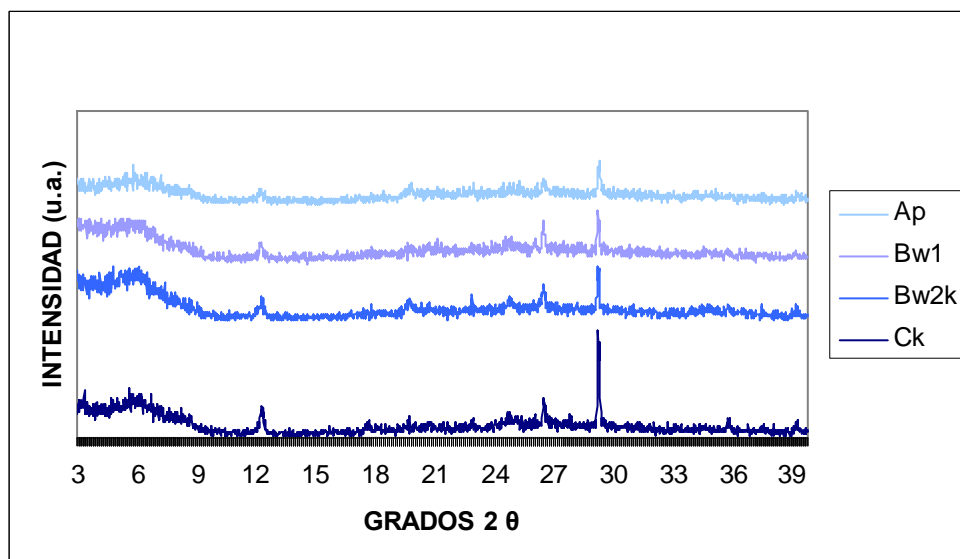
Gráf. VII.11. Difractograma de las muestras tamizadas del perfil de laboreo convencional



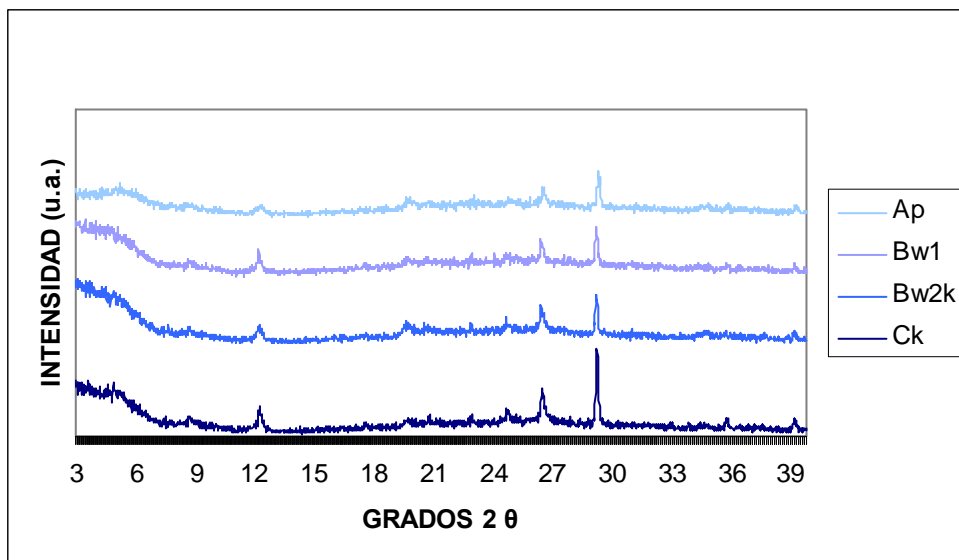
Gráf. VII.12. Difractograma de las muestras tratadas con KCl (1M) del perfil de laboreo convencional



Gráf. VII.13. Difractograma de las muestras tratadas con KCl (1M) y calentadas a 550°C del perfil de laboreo convencional



Gráf. VII.14. Difractograma de las muestras tratadas con MgCl₂ (1M) del perfil de laboreo convencional



Gráf. VII.15. Difractograma de las muestras tratadas con MgCl_2 (1M) y sometidas posteriormente a atmósfera saturada en etilenglicol del perfil de laboreo convencional

VI. BIBLIOGRAFÍA

VI. BIBLIOGRAFÍA.

- Abramowitz, M y Stegun, I. A. (Eds.) (1972). Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables, 9th printing. New York, Dover, 798 páginas.
- Ahmad, N y Mermut, A. (1996). Vertisols and technologies for management. Developments in Soil Science 24. Ed. Elsevier.
- Akaike, H. (1974). A new look at statistical model identification. Transactions on Automatic Control, AC-19, 716-723.
- Allen, M. B. y Arnon, D. I. (1955). The sodium requirement of *Anabaena cylindrica*. Physiologia plantarum, 8, 653-660.
- Álvarez-Benedí, J., García-Sinovas, D., Muñoz-Carpena, R, Bolado, S. (2001). Aplicación de la técnica de interrupción de flujo al estudio del transporte de solutos en columnas de suelo. En Temas de Investigación en Zona no Saturada. Eds. J. J. López y M. Quemada, Pamplona, 2001.
- Arnon, D. I. y Scout, P. R. (1939). The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. Plant Physiology, 14, pp. 371-375.
- Asensio, C. (1993). Génesis, degradación y evaluación de suelos vérticos en la Hoja de Álora (1052). Málaga. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- Asghar, M., Lack, D. W., Cowie, B. A., Parker, J. C. (1996). Effects of surface soil mixing after long-term zero tillage on soil nutrient concentration and wheat production. En: Asghar, M. (Ed), Proceedings of the 8th Australian Agronomy Conference, The Australian Society of Agronomy Inc., Toowoomba, Queensland, 88-91.
- Baena, R. (1993). Evolución cuaternaria (3 M. a) de la Depresión del Medio-Bajo Guadalquivir y sus márgenes (Córdoba y Sevilla). Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- Barrow, N. J. (1967). Studies on the adsorption of sulfate by soils. Soil Science, 104, 342-346.
- Benavidez, R. (2004). La cultura del arroz irrigado. En El arroz, su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos. Capítulo III. Director R. Benavidez. UNER UNL.
- Bending, G. D., Putland, C., Rayns, F. (2000). Changes in microbial community metabolism and labile organic matter fractions as early indicators of the impact of management on soil biological quality. Biol. Fert. Soils 31, 78-84.

- Bescansa, P., Imaz, M J., Virto, I., Enrique, A., Briones, M. J. I. Influencia de laboreo de conservación y manejo de residuos en el desarrollo de poblaciones de lombrices en suelos semiáridos. Actas del Congreso Internacional sobre Agricultura de Conservación, Córdoba 2005, 285-290.
- Bernard, C. y Schenck, C. (1986). Utilisation de ceramiques poreuses pour la solution du sol dans la ried central de l'ill en Alsace. Bulletin du Groupe français de humidité neutronique, 20, 73-85.
- Bocquier, G. (1973). Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Tesis Doctoral, Universidad Estrasburgo.
- Box, G. E. P. y Jenkins, G. M. (1976). Time series analysis, forecasting and control. Holden-Day, San Francisco.
- Bristol, A. W. y Garwood, E. A. (1984). Deposition of sulphur from the atmosphere and the sulfur balance in tour soils Ander grass. Journal of Agricultural Science, 103, 463-468.
- Brownell, P. F. y Wood, J. G. (1957). Sodium as an Essential Micronutrient Element for *Atriplex vesicaria*, Heward. Nature 179, 635-636.
- Buol, S. W., Hole, F. D. y Mc Cracken, R. J. (1981). Génesis y clasificación de suelos. Edición española, 1981.
- Calot, G. (1988). Curso de Estadística Descriptiva. Ed. Paraninfo.
- Candela, L., Fabregat, S., Solé, M., Rodríguez-Pacheco, R. L. (2003). Estudios cinéticos del transporte del herbicida 2,4-D en columnas de laboratorio. En Estudios en la Zona no Saturada del Suelo, 105-110. Eds. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero, Valladolid, 2003.
- Carvalho, J. L. N., Cerri, C. E. P., Cerri, C. C., Feigl, B. J., Piccolo, M. C., Godinho, V. P., Herpin, U. (2007). Changes of chemical properties in an oxisol after clearing of native Cerrado vegetation for agricultural use in Vilhena, Rondonia State, Brazil. Soil and Tillage Research, 96, 95-102.
- Cerana, J., Wilson, M. G., Pozzolo, O., de Batista, J. J., Arias, N., Banchemo, A. C., Sione, S. (2005). Determinación de las condiciones físicas de los vertisoles, orientadas al manejo sustentable con la Siembra Directa. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Paraná, Argentina.
- Cerdà, A. (1996). Soil agrégate stability in three mediterranean environments. Soil Technology, 9, 133-140.
- Cerdà, A. (2005). Implicaciones del manejo agrícola en la pérdida de agua por escorrentía. Estación experimental El Teularet-Sierra de Enguera, Valencia. Actas del Congreso Internacional sobre Agricultura de Conservación, Córdoba 2005, 309-313.

-
- Cerdà, A. y Lasanta, T. (2005). Pérdida de suelo y manejo agrícola en el Pirineo. Estación experimental Valle de Aísa, Huesca. Actas del Congreso Internacional sobre Agricultura de Conservación, Córdoba 2005, 321-326.
 - Conti, M. A. (2000). Dinámica de la liberación y fijación de potasio en el suelo. Archivo Agronómico nº4, Informaciones Agronómicas del Cono Sur nº8.
 - Contreras, V. (2005). Estabilización de cárcavas mediante mantas orgánicas y su mantenimiento como apoyo a la Agricultura de Conservación. Actas del Congreso Internacional sobre Agricultura de Conservación, Córdoba 2005, 333-338.
 - Cowling, D. W. y Lockyer, D. R. (1976). Growth of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) exposed to low concentration of sulfur dioxide. *Journal experimental Botanical*, 27, 397-401.
 - CTIC- Conservation Technology Information Center (1996). A Checklist for U.S. Farmers, West Lafayette, IN.
 - Dalal, R. C. (1989). Long-term effects of no-tillage, crop residue, and nitrogen application on properties of a Vertisol. *Soil Science Society American Journal*, 53, 1511-1515.
 - de Alba, S., Benito, G., Lacasta, A., Pérez-González, A (2003). Erosión hídrica en campos de agricultura extensiva de clima mediterráneo. Influencia del manejo del suelo en Castilla-La Mancha. *Revista de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*, 10, 103-113.
 - De la Rosa, D. y Moreira, J. M. (1987), Evaluación ecológica de Recursos Naturales de Andalucía. Agencia de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
 - Delta-T Devices. ThetaProbe soil moisture sensor. User Manual ML2-UM-1.
 - DeMaria, I. C., Nnabude, P. C., de Castro, O. M. (1999). Long-term tillage and crop rotation effects on soil chemical properties of a Rhodic Ferralsol in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 51, 71-79.
 - Duchaufour, P. H. (1975). Manual de Edafología. Ed. Toray-Masson. Barcelona.
 - Duchaufour, P. H. (1977). Atlas ecológico de los suelos del mundo, Ed. Masson, Barcelona.
 - Duchaufour, P. H. y Souchier, B. (1984). Edafología. 1. Edafología y clasificación. Ed. Masson, S. A. Paris, 1984.
 - Dudal, R. (1967). Sols argileux foncés des régions tropicales et subtropicales. Coll. FAO, cahier nº 83, 172 págs.
 - Emberger, L. (1930). Sur une formule climatique et ses applications en botanique. *La Meteorologie*, pp., 423 - 432.

- Espejo-Pérez, A. J., Rodríguez-Lizana, A., Giradles, J. V., Ordoñez, R. (2005). Influencia de la cubierta vegetal en la pérdida de suelo en olivar ecológico. Actas del Congreso Internacional sobre Agricultura de Conservación, Córdoba 2005, 345-350.
- FAO (1977). Guía para la descripción de perfiles de suelos. Roma.
- FAO (1998). Soil Map of the world 1:5.000.000. Report 60. Roma.
- Feliu, A. y Gueorguieva, I. (2003). La degradación y desertificación de los suelos en España. Guías técnicas de energía y medio ambiente de la Fundación Gas Natural.
- Fisher, R.A. (1915). Frequency distribution of the values of the correlation coefficient in samples from an indefinitely large population. *Biometrika*, 10, 507-521.
- Fisher, R.A. (1921). On the probable error of a coefficient of correlation deduced from small sample. *Metron*, 1, 3-32.
- Franzluebbers, A. J., Hons, F. M. (1996). Soil-profiles distribution of primary and secondary plant-available nutrients under conventional and no tillage. *Soil and Tillage Research*, 39, 229-239.
- Fuller, W. A. (1996). Introduction to Statistical Time Series. Wiley, New York, 2ª edición.
- Galán, E. y Espinosa de los Monteros, J. (1974). El caolín en España. Características, identificación y ensayos cerámicos. Ed. Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. I.S.B.N. 84-400-7912-5.
- Gardner, E. A., Coughlan, K. J., Silburn, D. M. (1988). Soil water measurement and management on Vertisol in Queensland, Australia. Management of Vertisol in Subshara, Africa. Proceeding of Conference held at ILCA, Addis Ababa, Ethiopia. Pp 131 – 165. International Livestock Centre for Africa. P. O. Box, Addis Ababa, Ethiopia.
- Gorczynski, W. (1920). Sur le calcul du degré du continentalisme et son application dans la climatologie. *Geografiska Annaler*, p. 324.
- Goulding, K. W. T y Poulton, P. R. (1985). Acid deposition at Rothamsted, Saxmundham and Woburn, 1969-83. *Soil Use and Management*, 1, 6-11.
- Grover, B. L. y Lamborn, R. E. (1970). Preparation of porous ceramic cups to be used for extraction of soil water having low soluble concentrations. *Soil Sci. Soc. Am. Pr.*, 34, 706-708.
- G.T.N.M.A. (1976). Determinaciones analíticas en suelos. Normalización de métodos II: Potasio, calcio y magnesio. *Anal. de Edafología Agrobiol.* XXXV nº 7 y 8.

-
- Guzmán, J. G., Godsey, C. B., Pierzynski, G. M., Whitney, D. A., Lamond, R. E. (2006). Effects of tillage and nitrogen management on soil chemical and physical properties after 23 years of continuous sorghum. *Soil and Tillage Research*, 91, 199-206.
 - Haines, P. J., Uren, N. C. (1990). Effects of conservation tillage farming on soil microbial biomass, organic matter and earthworm populations, in north-eastern Victoria. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 30, 365-371.
 - Hansen, E. A. y Harris, A. R. (1975). Validity of soil water samples collected with porous ceramic cups. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39, 528-536.
 - Hanson, J. B. (1984). *Advances in Plant Nutrition*, vol. 1 (eds. P. B. Tinker y A. Läuchli), p. 149, Praeger.
 - Harward, M. E. y Reisenauer, H. M. (1966). Reactions and movement of inorganic soil sulfur. *Soil Science*, 101, 326-335
 - Hernández, J. C., Orihuela, D. L., Pérez-Mohedano, S, Marijuan, L., Furet, N. R. (2003). Efecto de la modificación del pH sobre la lixiviación de cationes en columnas de suelos calizos. En *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*, 99-104. Eds. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero, Valladolid, 2003.
 - Hess, C. y Schoen, U. (1964). *Al Awamia*, 13.
 - Hoa, N. (2003). Soil potassium dynamics under intensive rice cropping. A case study in the Mekong Delta, Vietnam. Doctoral thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands. 216 p.
 - Hunter, H. M., Cowie, B. A. (1989). Tillage and stubble effects on nutrient distribution. En: Noble, R. M., Radford, B. J., Ruthenberg, S. J., Thorburn, P. J. (Eds.), *Biloela Research Station Programme Review*. Queensland Department of Primary Industries RQR89012, 61-62.
 - Ismail, L., Blevins, R. L., Frye, W. W. (1994). Long-term no-tillage effects on soil properties and continuous corn yields. *Soil Science Society American Journal*, 58, 193-198.
 - Jiménez, J. A., García, I., Vanderlinden, K., Perea, F., Muriel, J. L. (2005). Balance de agua en suelos arcillosos bajo laboreo convencional y siembra directa. *Actas del Congreso Internacional sobre Agricultura de Conservación, Córdoba 2005*, 397-402.
 - Jones, M. B., Rendig, W., Torell, D. T., Intuye, T. S. (1982). Forage quality for sheep and chemical composition associated with sulfur fertilisation. *Agronomy Journal*, 74, 775-781.
 - Jones, S. B., Wraith, J. M., Or, D. (2002). Time domain reflectometry measurement principles and applications. *Hydrological Processes*, 16, 141-153.

- Jungk, A. (2001). Movimiento de nutrientes a la interfase suelo-raíz, su rol en el suministro de nutrientes a las plantas. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1 (1), 1-18.
- Kenney, J. F. Y Keeping, E. S. (1962). "Kurtosis" *Mathematics of Statistics*, Pt. 1, 3rd ed. Princenton, NJ: Von Nostrand, 102-103.
- Kerner, F. (1.905). *Thermisodromen versucheiner Kartographischen Darstellung des jährlichen ganges der lufttemperatur*. K.K. Geogr. Gesell, Wien. 6(3).
- Kittrick, J. A. (1976). Control of Zn²⁺ in soil solution by sphalerita. *Soil Science Society American Journal*, 40, 314-319.
- Knight, M. J. (1980). *Geoderma*, 23.
- Krishna, P. C. y Perumal, S. (1948). Structure in Black Cotton soils of the Nizamsager Project area, Hyderabad state, India. *Soil Sci.* 66.
- Kolmogorov, A. (1933). On the empirical determination of a distribution function. *Giornale dell' Instituto Italiano degli Attuarari*.
- Kornblyum, E. A. (1967). *Pochvovedenie*, 11. *Soviet Soil Sci.*
- Kounetsron, O. K. (1976). *Altération des roches basiques du Mont Agou au Togo*. Tesis Doctoral, Universidad de París.
- Kubiena, W. L. (1938). *Micropedology*. Ames, IA: Collegiate Press.
- Kubiena, W. L. (1953). *The Soil of Europe*, Thomas Murby, London (1953).
- Lal, R., Logan, T. J., Fausey, N. R. (1990). Long-term tillage effects on a Mollic Ochraqualf in North-West Ohio. III. Soil nutrient profile. *Soil and Tillage Research*, 15, 371-382.
- Lang, R. (1915). Versuch einer exalten Klassifikation der Boden in klimatischer und geologischer Hinsicht. *Int. Mitt. f. Bodenkunde*, 5, 312-346.
- Lazcano, I. (2000). Deficiencia de calcio en tomate (*Lycopersicum esculentum* L.). En *Informaciones Agronómicas* n°39.
- Loch, R. J., Coughlan, K. J. (1984). Effects of zero tillage and stubble retention on some properties of a cracking clay. *Australian Journal Soil Researches*, 22, 91-98.
- López, A., Crende, P., Castelao, A. (2005). Uso del TDR en ensayos de movimiento de agua sobre columnas de suelo inalterado. En *VII Jornadas de Investigación en Zona no Saturada del Suelo*, 109-114. ZNS-05. Eds. J. Samper y A. Paz, A Coruña, 2005.
- MacRitchie, F. y Wrigley, C. W. (1986). Lipid composition of flour and quality changes associated with sulfur deficiency in wheat. *Cereal Chemistry*, 63, 378-385.

-
- Marmé, D. (1983). Inorganic Plant Nutrition (eds. A. Läuchli y R. L. Bielecki), Enciclopedia Pl. Physiol. (Nuevas Series), vol. 15 B, p. 599, Berlín.
 - Martin, A. (1980). Environmental Pollution (Series B), 1.
 - Martín, S. (2001). Guía completa de Statgraphics. Desde MSDOS a Statgraphics Plus. Ed. Díaz de Santos.
 - Martín-Rueda, I., Muñoz-Guerra, L. M., Yunta, F., Esteban, E., Tenorio, J. L., Lucena, J. J. (2007). Tillage and crop rotation effects on barley yield and soil nutrients on a *Calciortidic Haploxeralf*. Soil and Tillage Research, 92, 1-9.
 - Martín-Vivaldi, J. L., Rodríguez-Gallego, M. y Martín, J. M. (1968). Análisis cuantitativo de filosilicatos de la arcilla por difracción de rayos X para el estudio de la orientación preferente. Anales de la Real Sociedad Española de Física y Química, 64, p.p. 101-105.
 - Martínez, A. (2005). Influencia del manejo de los suelos agrícolas en clima mediterráneo en el control de la erosión y en la disponibilidad de agua para las plantas. Ponencia en el II Simposio Nacional sobre Control de la Degradación de Suelo, Madrid 2005, 53-70.
 - Massana, J., Gran, M., Carrera, J., Saaltink, M. W., Olivilla, S., Ayora, C., Lloret, A. (2005). Influencia de la salinidad en el flujo multifásico en columnas de suelo abiertas y bajo condiciones de evaporación. En VII Jornadas de Investigación en Zona no Saturada del Suelo, 39-44. ZNS-05. Eds. J. Samper y A. Paz, A Coruña, 2005.
 - Matowo, P. R., Pierzynski, G. M., Whitney, D. A., Lamond, R. E. (1999). Soil chemical properties as influenced by tillage and nitrogen sowed, placement, and rates after 10 years of continuous sorghum. Soil and Tillage Research, 50, 11-19.
 - Mengel, K. y Kirkby, E. A. (1982). Principles of Plant Nutrition (3ª ed.), International Potash Inst.
 - Mengel, K. y Kirkby, E. A. (1987). Potassium. In “Principles of Plant Nutrition”. Capítulo 10: 427-453. I.P.I. Bern, Switzerland.
 - Métodos oficiales de análisis, tomo III. (1986). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Dirección General de Política Agraria. Edita Secretaría General Técnica. Madrid.
 - Molinero, L. M. (2004). Análisis de Series Temporales. SEH-LELHA, Sociedad Española de Hipertensión y Liga Española para la lucha contra la hipertensión arterial, Enero, 2004. www.seh-lelha.org
 - Montealegre, L. (1976). Mineralogía de sedimentos y suelos (Depresión del Guadalquivir). Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
 - Montel, N. (1968). Kolmogorov-Smirnov Tests and Renyi's Modification. Biometrics, vol. 24, nº 4, 1018-1023.

- Montoya, M. I., Martín, M. (2005). Análisis de la varianza (ANOVA) en ensayos de lixiviación de N-purín en columnas experimentales. En VII Jornadas de Investigación en Zona no Saturada del Suelo, 15-21. ZNS-05. Eds. J. Samper y A. Paz, A Coruña, 2005.
- MOPT (1992). Medio Ambiente en España 1991. MOPT, Madrid.
- Munsell Color Division (1971). Munsell Color Charts. Baltimore, Maryland. USA.
- Muriel, J. L., Vanderlinden, K., Perea, F., García, I., Jiménez, J. A. (2005). Dinámica del agua en suelos sometidos a distintos sistemas de laboreo. VI Simposio del agua en Andalucía. IGME. López-Geta, J. A., Rubio, J. C., Martín, M. (Eds.), 727-737.
- Nagpal, N. K. (1982). Comparación among and evaluation of ceramic porous cup soil water samplers for nutrient transport studies. Can. J. Soil Sci., 84 pp.
- Navarro, S. y Navarro, G. (2000). Química Agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- Nguyen Kha. (1973). Reserches sur l'évolution des sols à texture argileuse en conditions tempérées et tropicales. Tesis Doctoral, Universidad Nancy I.
- Olsen, R. A. (1957). Absortion of sulfhur dioxide from the atmosphere by cotton plants. Soil Science, 84, 107-111.
- Orihuela, D. L., Hernández-Domínguez, J. C., Pérez-Mohedano, S. Marijuan de Santiago, L., González- Martínez, A. (2005). Balance de masas de agua de riego en columnas de suelos calizos de Andalucía. En VII Jornadas de Investigación en Zona no Saturada del Suelo, 319-323. ZNS-05. Eds. J. Samper y A. Paz, A Coruña, 2005.
- Orihuela, D. L., Hernández-Domínguez, J. C., Romero, E., González, A. (2001). Lixiviación de formas solubles de Ca^{++} , K^+ y PO_4^- y su relación con la c.e. y el pH en condiciones experimentales (Huelva. España). En Temas de Investigación en la Zona no Saturada. Eds. J. J. López Rodriguez, M. Quemada Sáez-Badillos. Pamplona, 2001.
- Ortega, E. (1993). Características de los suelos vérticos de la Provincia de Málaga. Memoria. Universidad de Granada. Inédita.
- Paquet, H. (1969). Evolution géochimique des mineraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux. Tesis Doctoral, Universidad Estrsburgo.
- Parsons, R. B., Moncharoan, L., Knox, E. G. (1973). Soil Sci. Soc. AMER. Proc., 37.
- Peña, D. (1998). Estadística. Modelos y Métodos II. Modelos Lineales y Series Temporales. Ed. Alianza Universidad Textos. Sexta edición.

-
- Peña, D. (1999). Modelos y Métodos I. Fundamentos. Ed. Alianza Universidad Textos. Décima edición.
 - Peña, D. (2005). Análisis de Series Temporales. Ed. Alianza Editorial.
 - Perea, F. (2004). Estudio de la influencia del manejo del suelo en el régimen térmico de los vertisuelos de la Vega de Carmona. En Carel, Carmona Revista de Estudios Locales.
 - Perea, F., Jiménez, J. A., García, I., Vanderlinden, K., Muriel, J. L. (2006). Caracterización hidroclimática en vertisuelos de la Campiña de Carmona. En Carel, Carmona Revista de Estudios Locales.
 - Perea, F. y González, P. (2005). Origen, clasificación y caracterización de los suelos de la Campiña de Carmona. En Carel, Carmona Revista de Estudios Locales.
 - Pérez, C. (2003). Estadística Práctica con Statgraphics. Ed. Prentice Hall.
 - Pérez, E., Asensio, C., Iriarte, A., Ortega, E. (2000). Curvas de pF en Vertisoles del Sur de España. Boletín de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo, nº 7-3, pp. 197 – 207.
 - Pinta, M. (1971). Spectrometrie d'absorption atomique. Ed. Masson et cie. Paris.
 - Richards, L. A. (1947). Pressure-Membrana apparatus construction and use. Agr. Engin. 28, 451-454.
 - Rodríguez, J. y González, I. (1987). Dinámica de las vertientes en los Alcores (Carmona, Sevilla). Actas VII Reunión sobre el Cuaternario, AEQUA, Santander, 107,114.
 - Ruiz-Maya, L y Martín, F. J. (1995). Estadística I: probabilidad y Estadística II: Inferencia. Ed. AC.
 - Ruppert, D. (1987). What is Kurtosis? An influence function approach. American Statistic, 41, 1-5.
 - Sánchez-Pérez, J. M. y Morell, I. (1994). Precauciones de uso de los tomamuestras de succión equipados con cerámica porosa. En Investigación en Zona No Saturada, 9-15. Ed. I. Morell.
 - Santos, F. (1979). Estudios geológicos y edafológicos del sector Montiel-Alcaraz-Bienservida (Ciudad Real-Albacete). Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
 - Seddoh, F. y Pedro, G. (1974). Bull. Groupe fr. Argiles, 26.
 - Shapiro, S. y Wilk, M (1965). An Analisis of Variance Test for Normality. Biometrika, 591-611.

- Shaw, R. J. y Yule, D. F., (1978). The assesment of soil for irrigation, Esmerald, Queensland. Technical Report n° 13. Agricultural Chemistry Branch, Deparment of Primary Industries, Brisbane, Australia. Pp 84.
- Smirnov, N. V. (1939). On the estimation of the discrepancy between empirical curves of distribution for two independent samples. Bull Math. Univ. Moscou.
- Soil and Water Conservation Service (1995). Summary. Farming for a better environment. White paper, SWCS.
- Soil Conservation Service (1975). Soil Taxonomy, USDA Agr. Hbk., n° 436. Washington.
- Standley, J., Hunter, H. M., Thomas, G. A., Blight, G. W., Webb, A. A. (1990). Tillage and crop residue management affect Vertisol properties and grain sorghum growth over seven years in the semi-arid-sub-tropics. 2. Changes in soil properties. Soil and Tillage Research, 18, 367-388.
- Terry, N. (1977). Photosynthesis, Growth and the Role of Chloride^{1,2}. Plant Physiology, 60, 69-75.
- Thomas, G. A., Dalal, R. C., Standley, J. (2007). No-till effects on organic matter, pH, cation exchange capacity and nutrient distribution in a Luvisol in the semi-arid subtropics. Soil and Tillage Research, 94, 295-304.
- Thornthwaite, C. W. (1.948). An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev., 38, 55-94.
- Topp, G. C., Davis, J. L., Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research 16, 574-582.
- Wagner, G. H. (1962). Use of porous ceramic cups to sample soil water within the profile. Soil Sci., 94, 203-207.
- Walker, R. B., Walker, H. M. y Ashworth, P. R. (1955). Calcium-Magnesium nutrition with special reference to Serpentine Soils. Plant Physiology, 30 (3), 214-221.
- Warburg, O. y Luttgens, W. (1946). Photochemical reduction of quinone in green cells and granules. Biokhimiya 11, 303-322.
- Wedepohl, K. H. (1978). Handbook of Geochemistry, Vol. II-2. Cap. 16, Springer-Verlag, Berlín.
- Whalley, W. R. (1994). Considerations on the use of time domain reflectrometry for measuring soil water content. Journal Soil Science 44, 1-9.
- White, I., Knight, J. H. Zegelin, S. J., Topp, G. C. (1994). Comments on “Considerations on the use of time domain reflectrometry for measuring soil water content” by W. R. Whalley. Journal Soil Science 43, 1-13.

- Wild, A. (coord.) (1992). Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. I.S.B.N. 84-7114-400-X.
- Williams, C. H. (1975). Sulphur in Australian Agriculture, ed. K. D. McLachlan. Sydney Univ. Press.
- Zegelin, S. J., White, I., Jenkins, D. R. (1989). Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurements using time domain reflectometry. *Water Resources Research* 25, 2367-2376.

Bibliografía internet

- AEAC.SV (en línea). Asociación Española de Agricultura de Conservación. Suelos Vivos, Introducción [Consulta: 20 de diciembre de 2006]. <http://www.aeac-sv.org/html/intro.html>
- Zona No Saturada (en línea). Investigación en Zona No Saturada, Presentación. [Consulta: 10 de enero de 2007]. <http://www.zonanosaturada.com/znsinfo2.html>