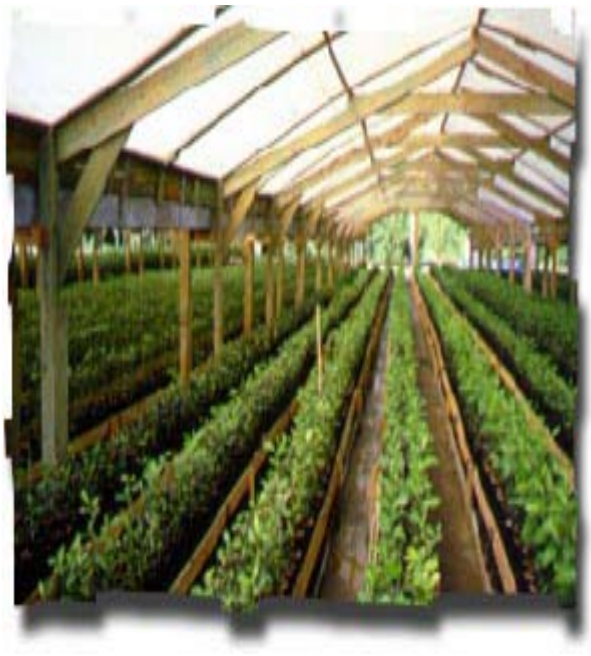
PROGRAMA DE VOLUNTARIADO UNIVERSITARIO

Recuperación de suelos degradados de pequeños productores del cinturón hortícola del Gran La Plata. Valoración del problema y estrategias correctivas



Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales
Universidad Nacional de La Plata

Coordinación general

Dra Mabel Vázquez – Ing. Agr. Antonino Terminiello

Edición literaria

Dra Laura Draghi

2008

RESPONSABLES DEL PROGRAMA

Dirección:

Ing. Agr. Antonino Terminiello
Dra. Mabel E. Vázquez

Docentes:

Ing. Agr. Ricardo Andreau
Ing. Agr. Mirta García
Lic. Paula Citarella
Ing. Ftal. Pablo Gelati
Ing. Agr. Guillermo Millán
Ing. Agr. Roberto Balbuena
Ing. Agr. Jorge Claverie
Dr. Daniel Jorajuría
Dra. Laura Draghi

Alumnos:

Fernando Balmaceda
Hernán Casalla
Eduardo Cribellati
Macarena Forneris
Facundo Guilino
Luciano Juan
Luciano Lombardi
Viviana Mirabilio
Matilde Mur
Sebastian Olano
Diego Santos Sbuscio
Débora Serrudo
Sebastián Walker

Se agradece el material suministrado y la revisión general de este documento al Ing. Agr. Luis Balcaza. INTA Gran Buenos Aires.

Se agradecen las ilustraciones proporcionadas por la Ph D Patricia Imas y el Ph D Ricardo Melgar.

PRÓLOGO

El presente manual constituye un material de apoyo para los talleres de concientización y capacitación que se desarrollarán durante 2008 en el marco del Proyecto de Voluntariado Universitario ***"Concientización y capacitación en estrategias de recuperación de suelos degradados para pequeños productores flori-hortícolas del gran La Plata"*** de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.

El proyecto tiene como primer objetivo contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de la población rural de la localidad, al tiempo que intenta promover el desarrollo de sistemas de producción sustentables que colaboren en la conservación y recuperación de los suelos.

La producción flori-hortícola argentina en general y del Partido de La Plata en particular, se ha caracterizado en el pasado por el manejo del suelo en base a costumbres y tradiciones de las comunidades locales o de extranjeros, dedicadas a este tipo de producción agrícola. Así, en muchos casos de suelos de establecimientos de pequeños productores sin asesoramiento técnico, a consecuencia de fertilizaciones inorgánicas y orgánicas inadecuadas, o la aplicación de correctores de tipo o dosis incorrectas, ha conducido a suelos con contenidos notablemente altos de nutrientes poco solubles, al punto de producir toxicidades, así como carencias o desequilibrios de otros elementos, entre otros perjuicios. El riego con agua de mala calidad sin tecnologías adecuadas, ha producido la salinización y sodificación de muchos suelos, particularmente en producciones bajo cubierta. El laboreo excesivo con herramientas agresivas desde el punto de vista de la conservación de las propiedades físicas de los suelos, es otro problema frecuente con derivaciones en condiciones adversas para el normal desenvolvimiento de las raíces y la mala circulación del aire y del agua.

Algunas de estas consecuencias son de escasa reversibilidad en el corto y mediano plazo y esto trae aparejado perjuicios socio-económicos severos. En otras ocasiones, se ignora el origen de los problemas de rendimiento y por desconocimiento, no se abordan las prácticas necesarias para la solución de los mismos.

Constituye una preocupación institucional apoyar a los pequeños productores de la región, mediante el desarrollo de conocimientos sobre el diagnóstico y tratamiento de suelos afectados en su fertilidad, así como su transferencia. Es por esa razón que un grupo de docentes y alumnos de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata, ha desarrollado este material escrito, pretendiendo contribuir de esta manera, a brindar pautas para el diagnóstico eficiente del problema en cada establecimiento y la elección de adecuados tratamientos de recuperación o prevención de situaciones de degradación.

"Sudor y lamentaciones es el impuesto que debemos pagar por la ignorancia de haber supuesto indestructible el suelo que la Providencia puso bajo nuestros pies, para darnos vida y suministrarnos alimentos"

Ing. Agr. Lorenzo Parodi

ÍNDICE

	Pág.
El suelo y sus componentes *Ing. Agr. Mirta García*	**5**
Nutrientes presentes en los suelos *Ing. Agr. Mirta García- Dra. Mabel Vázquez*	**12**
Fertilidad de los suelos	**17**
Ing. Agr. Mirta García-Dra. Mabel Vázquez	
Características del clima y suelos del cordón hortícola del Gran La Plata *Ing. Agr. Mirta García- Dra. Mabel Vázquez*	**20**
Muestreo y diagnóstico *Dra. Mabel Vázquez*	**26**
Problemáticas de índole química en los suelos *Dra. Mabel Vázquez*	**33**
Fertilizantes *Ing. Mirta García*	**41**
Técnicas de fertilización *Dra. Mabel Vázquez*	**46**
Fertirriego *Dra. Mabel Vázquez*	**48**
Algunos ejemplos de fertilización en cultivos tipo *Dra. Mabel Vázquez*	**66**
Enmiendas orgánicas *Ing. Ftal. Pablo Gelati*	**75**
Problemática ambiental de la fertilización *Luciano Juan*	**84**
Problemáticas de índole física en los suelos *Dr. Daniel Jorajuría, Msc. Jorge Claverie, Ing. Agr. Antonino Terminiello*	**91**
Descompactación mecánica *Ing. Agr. Roberto Balbuena*	**114**
Calidad de agua de riego. Tratamiento de suelos afectados. *Ing. Agr. Ricardo Andreau*	**144**
Bibliografía	**157**

EL SUELO Y SUS COMPONENTES

Ing. Agr. Mirta García

El suelo resulta de la descomposición de la roca madre por factores climáticos y bióticos (microorganismos, vegetación, fauna edáfica), lo que implica que está conformado por una fracción mineral y otra orgánica (Figura 1). Es esta condición de sistema órgano-mineral, con una profusa actividad microbiológica, lo que le permite ser el sustento de numerosas especies vegetales y animales.

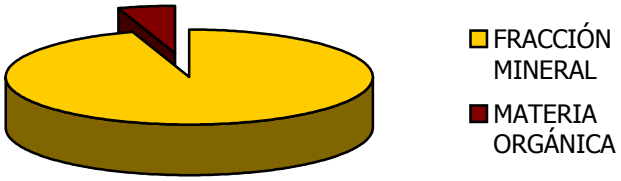


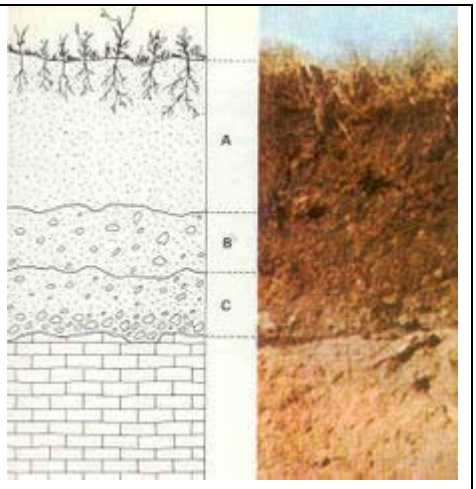
Figura 1. Esquema de la composición del suelo

La descomposición de la roca madre suministra los elementos minerales, mientras que los restos de vegetación y de fauna dan lugar a la formación de la materia orgánica, que a través de su descomposición da origen a los que se denomina humus del suelo.

Diferentes fracciones del humus conforman con los minerales arcillosos, los denominados complejos arcillo-húmicos, que le confieren características de fertilidad al suelo. Desde el punto de vista químico, la materia orgánica humificada brinda la posibilidad de retener nutrientes para las plantas y suministrarlos paulatinamente a través de su descomposición o intercambio de los mismos. Desde el punto de vista físico, mejora otras propiedades que se desarrollarán posteriormente, como estabilidad estructural, capacidad de retención hídrica, porosidad, etc.

La profundización de los procesos de alteración mecánica y meteorización química y su evolución a través del tiempo, conducen a la diferenciación de estratos sucesivos más o menos paralelos a la superficie del suelo, de espesor y características variables que reciben el nombre de **horizontes**. El conjunto de horizontes se llama **perfil.**

Los horizontes sucesivos están tanto o más diferenciados cuanto más evolucionado es el perfil, su designación se realiza mediante letras A, B (horizontes edafológicos propiamente dichos), C (material originario), entre los principales.



Si se toma un trozo de suelo y se lo observa con detalle puede distinguirse; una parte sólida, constituida por una fracción mineral y otro orgánica. La fracción mineral presenta

partículas de diferentes tamaños, algunas visibles a simple vista y otras más microscópicas. Estas partículas reciben el nombre de

- Arena: la fracción más gruesa
- Limo: la fracción intermedia
- Arcilla: la fracción más fina

La proporción de estos elementos en su composición física determina la **textura** del suelo.

Con un grado de humedad apropiado puede observarse que al desmenuzar suavemente el trozo mencionado, no se desprenden las partículas de arena, limo y arcilla. En los buenos suelos agrícolas se desmenuzan otros trozos de forma y tamaño variables, denominadas agregados, constituidos por la unión de estas partículas primarias. La materia orgánica es uno de los componentes que más contribuye a la ligazón de las partículas actuando como agente cementante y favoreciendo la estabilidad de estructural de los suelos.

Entre los agregados puede notarse que quedan espacios libres entre sí y cuando se observa con detalle a un agregado se percibe, a veces a simple vista o con ayuda de instrumentos ópticos, poros de tamaño y configuración variada que pueden estar ocupados por aire y/o agua.

Los cultivos para su desarrollo óptimo requieren un justo equilibrio agua-aire, que le permita una fácil absorción de agua y a su vez una suficiente aireación a nivel de la rizósfera.

Las proporciones de las diferentes fases componentes del suelo varían entre (Figura 2):

- Sólida: mineral y orgánica (40-60%)
- Líquida: (25-35 %)
- Gaseosa: (15-25%)

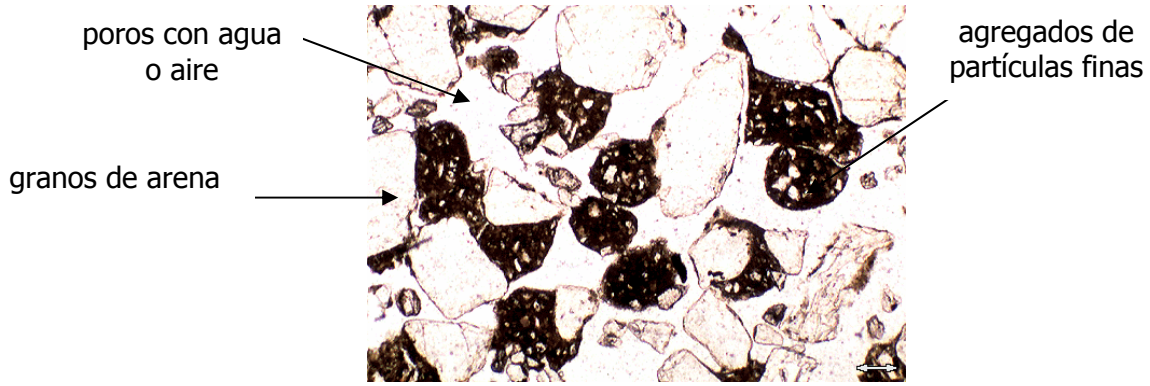


Figura 2. Visión microscópica de la composición básica del suelo

El mayor o menor predominio de las fracciones minerales gruesas o finas en un suelo marca determinadas propiedades. Por lo tanto se pueden clasificar a los suelos por clases texturales, de acuerdo al tamaño predominante de estas partículas primarias inorgánicas (Figura 3).

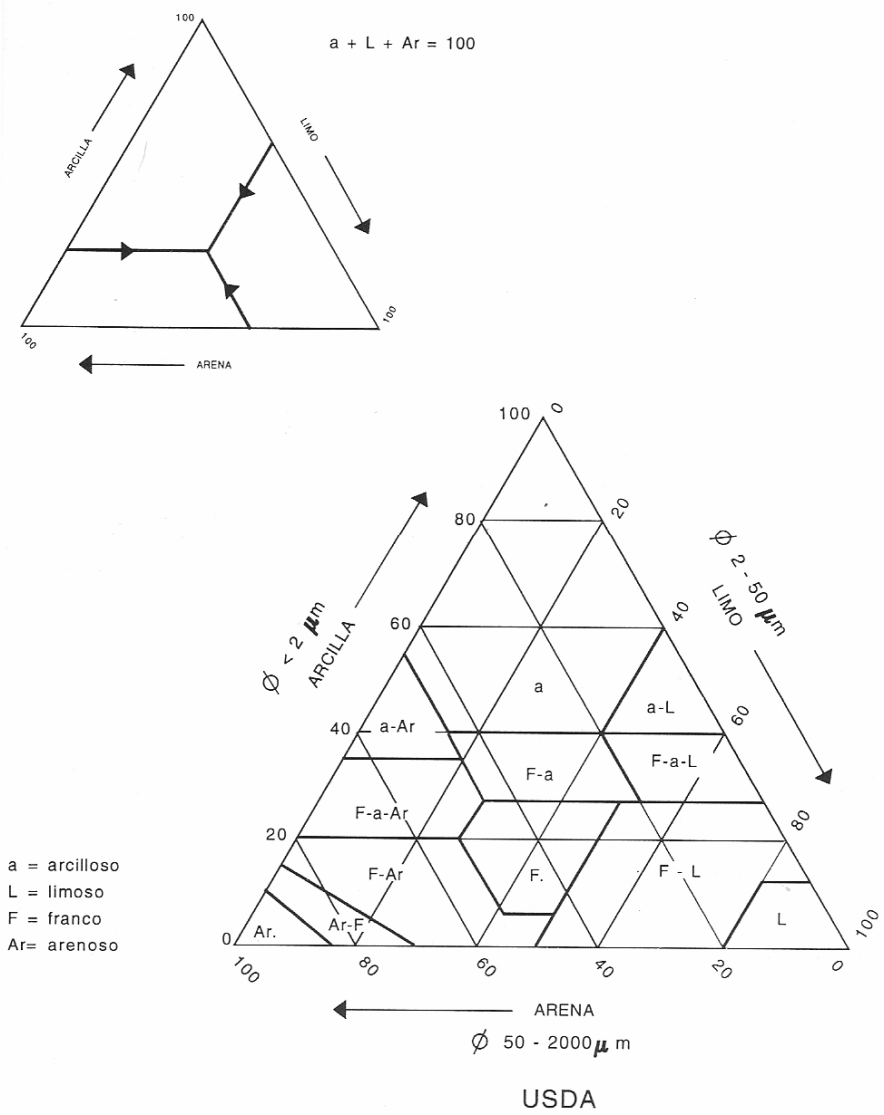


Figura 3. Clasificación de las clases texturales en función de los contenidos de arcilla, limo y arena

Clases texturales

- *arcillosas*: suelos plásticos, denominados pesados, difíciles de trabajar y con fuerte poder adhesivo
- *arenosas*: suelos ligeros, faltos de cohesión, fáciles de trabajar y susceptibilidad a la erosión eólica
- *con predominio de la fracción limosa:* suelos ligeros, poco cohesivos, muy susceptibles a la erosión, los encostramientos y las densificaciones subsuperficiales
- *francas:* equilibrio entre los componentes de las distintas fracciones, son los suelos con mejores características físico-químicas para la implantación y desarrollo de los cultivos.

La textura es la matriz potencial de un suelo, muchas de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos dependen de la textura, cuya potencialidad puede ser modificada en virtud de los procesos que lleven a la formación de agregados. Una síntesis de las propiedades mencionadas pueden verse en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales características de los suelos arenosos y arcillosos

Propiedades	**Suelo**	
	Arenoso	Arcilloso
Porosidad Total	Baja	Elevada
Macroporos	Elevados	Bajos
Microporos	Bajos	Elevados
Retención hídrica	Baja	Alta
Aireación	Buena	Regular a mala
Permeabilidad	Buena	Moderada a mala
Temperatura	Alta amplitud	Baja amplitud
Contracción y expansión	Nula	Presente
Capacidad de cambio de iones	Baja	Alta
Desgaste de herramientas	Elevado	Bajo
Nivel de fertilidad	Bajo	Alto
Formación de costras	Bajo	Alto
Conservación de la materia orgánica	Dificultoso	Menos dificultoso
Densidad aparente	Alta	Baja

En la naturaleza, como dijimos anteriormente, estas partículas primarias se agrupan en agregados, que se podrían considerar como partículas secundarias. Es un agrupamiento natural de las fracciones del suelo en los que la fuerza de atracción entre ellas es superior que las del medio que las rodea, es decir que las fuerzas de atracción entre las partículas primarias son mayores que las que actúan entre agregados.

El modo en que estos agregados se disponen entre sí determina la **estructura** del suelo. El estudio de la estructuración de los suelos comprende:

- Tamaño y forma de los agregados individuales
- Configuración u ordenamiento de los agregados dentro de la masa del suelo, sin alteración
- Estabilidad de los agregados: resistencia a la acción de agentes negativos como agua, labores culturales, pisoteo animal, etc.

Los tipos de estructura se ilustran a continuación (Figura 4)

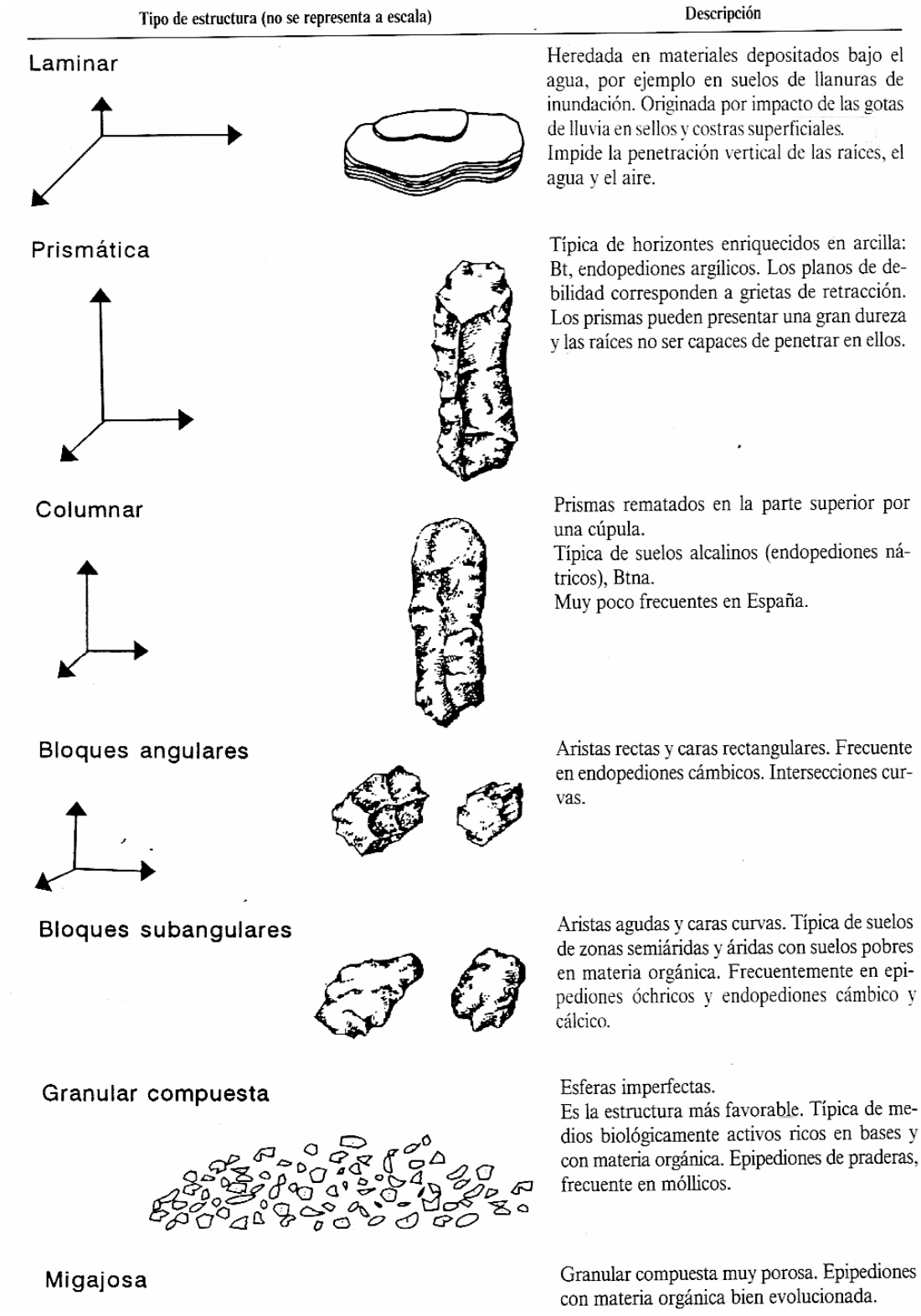


Figura 4. Diferentes estructuras del suelo.

Una estructura ideal es aquella que le confiere al suelo determinadas propiedades físicas, tales como una buena infiltración y una percolación de grado medio, que sea tan cohesiva como para permitir un buen anclaje de raíces, sin que sea tan densa que se constituya en un impedimento para su crecimiento.

En la conservación de buenas condiciones estructurales, se buscan dos objetivos:

a) producción de buenos cultivos
b) conservación del suelo, en base a la disminución de los procesos erosivos

Las labores culturales y el uso de maquinarias deben procurar conservar las características estructurales que permitan estos objetivos. Dependiendo de las condiciones climáticas del lugar, pendiente, profundización de la napa y el cultivo, en general se puede decirse que:

- Para los primeros 20-30 cm es conveniente una abundancia de poros grandes (macroporos), con agregados de buena estabilidad, tamaño medio, con lo cual se logra una buena infiltración del agua y menores riesgos de erosión.
- Para los 20-30 cm hasta aproximadamente 150 cm es deseable la presencia de abundantes microporos, con una cantidad adecuada de macroporos. Estos últimos asegurarán la eliminación del agua en exceso y a velocidad deseable, mientras que los primeros no solo facilitan el movimiento horizontal, sino que también constituyen el reservorio de la misma.

Tanto el suelo como la vegetación se ven afectados por las condiciones estructurales presentes. Si esta contiene una proporción apreciable de agregados relativamente estables, de tamaño moderado (1 a 5 mm), se asegura buenas condiciones de aireación, mientras no existan otros inconvenientes para un buen drenaje, por ejemplo una napa cercana.

Cuando el suelo no alcanza a eliminar el exceso de agua proveniente de lluvias o riego, la vegetación sufre por falta de oxígeno. La eliminación de dicho exceso depende de la presencia de una cantidad adecuada de poros más grandes.

Existen suelos que al estar secos ante una lluvia o riego tienen un drenaje excesivo. Esto ocurre cuando tienen una alta proporción del material arcillo-expandente. En estos casos, al secarse la masa se contrae, produciéndose grietas por las cuales pasa el agua rápidamente, pero cuando se humedecen lo suficiente, se produce una expansión que tapa dichas grietas y el drenaje se hace sumamente lento. Esta condición es bastante frecuente en los suelos del Gran La Plata.

Por otro lado, la capacidad de retención de agua puede ser baja, cuando los poros resultantes de la estructura son grandes. Si los agregados demuestran una distribución de tamaño tal que haya predominio de poros finos, el total de la masa del suelo tendrá mayor capacidad de retención de agua.

Las condiciones de un buen equilibrio agua-aire favorece, además, la mineralización de la materia orgánica por actividad microbiana, mejorando la disponibilidad de N, P, S y otros nutrientes.

Cuando se destruye la estructura de la capa superficial del suelo, suelen formarse costras o láminas densificadas que constituyen un obstáculo a veces insalvable para la emergencia de las plántulas. La destrucción de la estructura en capas inferiores (piso de arado, compactación subsuperficial) puede ser tal que impida el pasaje y crecimiento de las raíces.

Es interesante definir algunas mediciones químicas que se realizan en el laboratorio y sirven para diagnosticar posibles problemáticas en la nutrición de las plantas, temáticas que se desarrollarán posteriormente en forma detallada.

La **acidez o basicidad de los suelos** se expresa a través de la medida del valor de pH y es denominada en términos generales reacción del suelo. Los valores del pH se reducen a medida que la concentración de los iones de hidrógeno incrementan, variando entre un rango de 0 a 14. Los valores por debajo 7 son ácidos, valores superiores a 7 son alcalinos y/o básicos, mientras que el valor de 7 es denominado neutro. Por cada unidad de cambio en pH hay un cambio 10 veces la magnitud de la acidez o alcalinidad (por ejemplo: un pH 6 es diez veces más ácido que uno de pH 7, mientras que un pH 5 es 100 veces más ácido que el de 7).

Los cultivos crecen y se desarrollan en un rango de pH óptimo según la especie, como así también los nutrientes presentan sus formas disponibles en un determinado rango de pH, tanto en condiciones de acidez extrema como de basicidad pueden producirse fenómenos de toxicidad, entre los diferentes aspectos vinculados a esta medida.

Otro problema que se puede presentar es la **salinidad de los suelos** tanto en la agricultura de secano como bajo riego. Si se tiene en cuenta que el agua se evapora en forma gaseosa y por lo tanto libre de sales y también las plantas transpiran vapor de agua, el resultado final es que el proceso de evapotranspiración implica ineludiblemente que las sales se concentran en el agua remanente en el suelo.

Cuando se cultiva bajo riego, el aporte de sales con el agua de riego es generalmente considerable. Si se aplica en dosis superiores a la evapotranspiración de los cultivos, se puede producir el lavado de las sales de la zona de raíces, si el sistema es capaz de transmitir y drenar en profundidad el agua del lavado. Sin embargo, si la capacidad de drenaje del suelo se encuentra impedida por un horizonte arcilloso como el Bt u otras capas endurecidas el riego puede producir un efecto contrario al deseado, debido a que las sales suministradas por el agua de riego no pueden ser lavadas, por lo que se concentran y acumulan en la zona de raíces. En estos casos, si los riegos continúan, se puede favorecer la inducción de capas freáticas superficiales que, en el proceso de ascenso capilar y evapoconcentración del agua, conducen a una acumulación superficial de sales. El tiempo que una agricultura bajo riego puede continuar sin un drenaje adecuado, dependerá del clima de los suelos, de la hidrogeología y del manejo del agua.

La cantidad de sales presentes en el suelo puede ser estimada en el laboratorio mediante un conductímetro en el cual se mide la conductividad eléctrica (CE) de una pasta saturada o en un extracto de saturación de suelo. Esta medida es proporcional a la concentración de sales en la solución. Se expresa en la unidad de deciSiemens por metro (dS/m) en el Sistema Internacional. Otras unidades utilizadas son milimohs por centímetro o micromohs por centímetro (mmhos/cm = dS/m y µmho/cm = 1/1000 mmho/cm).

Los suelos se clasifican en clases de salinidad y los cultivos ven afectados en sus rendimientos de acuerdo al nivel de salinidad en forma variable. Orientativamente, en la Tabla 2 puede observarse una clasificación de la salinidad de acuerdo a la CE.

Tabla 2. Calificación de la salinidad según conductividad eléctrica (CE) y potencial efecto sobre los cultivos.

Clase de salinidad	**CE (dS/m)**	**Efecto sobre los cultivos**
Ligeramente salinos	*2 – 4*	*Rendimientos restringidos en cultivos sensibles a la salinidad*
Medianamente salinos	*4 – 8*	*Rendimientos restringidos en la mayor parte de los cultivos*
Fuertemente salinos	*8 – 16*	*Sólo los cultivos tolerantes pueden tener rendimientos satisfactorios.*

NUTRIENTES PRESENTES EN LOS SUELOS

Ing. Agr. Mirta García- Dra. Mabel Vázquez

Los elementos esenciales para las plantas (Figura 5) y sus símbolos son:

C: carbono.	K: potasio.	Zn: zinc
H: hidrógeno.	Ca: calcio.	Mo: molibdeno.
O: oxigeno.	Mg: magnesio.	B: boro.
N: nitrógeno.	Fe: hierro.	Cl: cloro.
P: fósforo.	Mn: manganeso.	(Na: sodio.)
S: azufre.	Cu: cobre.	(Si: silicio)
		(Co: cobalto)

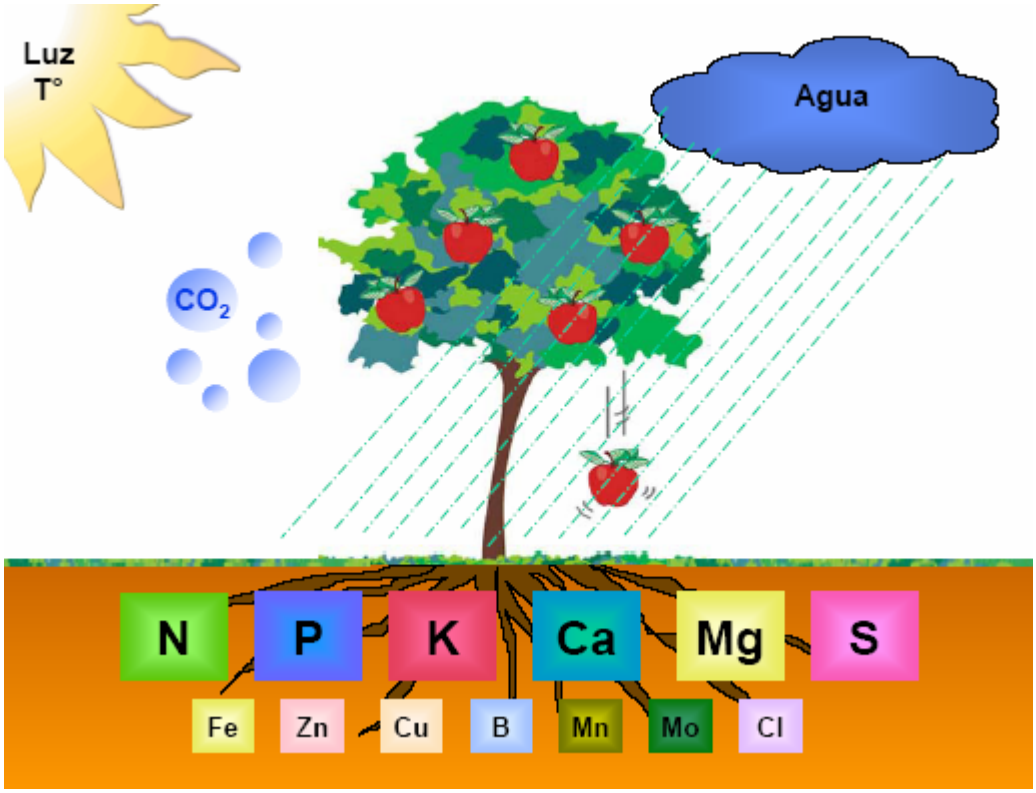


Figura 5. Esquema de macro y micronutrientes de los vegetales

El C y el O provienen exclusivamente de la atmósfera. El resto, si bien pueden tener ciclos que involucran fases atmosféricas como el caso del N, son tomados a partir de la fase líquida del suelo.

Estos elementos se dividen desde el punto de vista de la nutrición vegetal, en macro y micronutrientes, según las cantidades requeridas. Los macronutrientes son requeridos en cantidades relativamente grandes, sus contenidos generalmente son mayores a 500 microgramos por gramo de vegetal, y los micronutrientes en cantidades menores a 50 microgramos por gramo de vegetal.

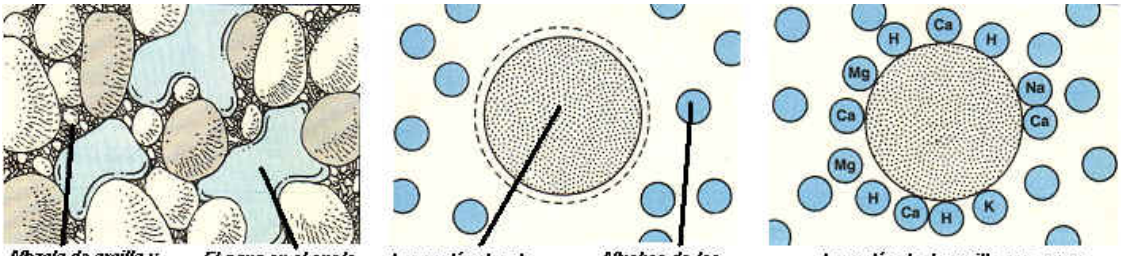
N, P, S, K, Ca y Mg son macronutrientes. Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B y Cl son micronutrientes.

El Na, el Si y el Co no se consideran esenciales para todas las plantas superiores, es por ello que aparecen entre paréntesis en la lista de elementos.

El ciclo de los nutrientes y la fertilización

Los nutrientes que toman las plantas de la fase líquida o solución del suelo (Figura 2), se originaron mayoritariamente en los minerales (rocas o sedimentos) a partir de los cuales se desarrollaron los diferentes suelos. Por ello, cada tipo de suelo posee una fertilidad característica, que el hombre a través de acciones puede modificar. En el caso del nitrógeno, de gran abundancia en la atmósfera (cerca del 70% del aire que respiramos), puede ingresar al suelo a través de mecanismos de fijación microbiológica, simbiótica y no simbiótica (inoculación). Otros elementos como el azufre, también el nitrógeno, pueden entrar a él, bajo formas químicas particulares y en general, en pequeñas cantidades, a través de las lluvias.

Para que los minerales del suelo puedan liberar los nutrientes a la solución, deben sufrir un proceso denominado *meteorización*[1], por el que, ya sea cambiando de estructura o perdiéndola totalmente, los pueden ir liberando paulatinamente. Estos procesos son más intensos cuanto mayor es la temperatura y precipitación a la que están sujetos. A partir de la solución del suelo, las plantas y los microorganismos los toman, para luego reincorporarlos, a través de los residuos, rastrojos, raíces, cuerpos bacterianos y fúngicos muertos, entre otras formas. Es así, que esta materia orgánica puede constituirse en fuente secundaria de nutrientes, debiendo producirse la *mineralización*[2] de la misma, para que vuelvan a encontrarse disponibles en la solución del suelo. Tanto la meteorización de los minerales como la mineralización de la materia orgánica, no constituyen ganancias netas de nutrientes, sino mecanismos de retransformaciones dentro del sistema. Adicionalmente, los nutrientes del suelo sufren, en mayor o en menor medida de acuerdo al elemento considerado, procesos de precipitación, inclusión en minerales que se sintetizan in situ, *adsorción*[3] (Figura 6), entre otros, que disminuyen la disponibilidad de los mismos en la solución. Algunos elementos están sujetos a la pérdida por *lixiviación*[4], mediante la cual el agua de lluvia que atraviesa el suelo, va arrastrando estos elementos a capas profundas y en algunos casos, hasta las napas, provocando de esta manera, otra disminución de su contenido, es decir una pérdida de nutrientes. El caso más emblemático es el del nitrógeno, debido a su alta solubilidad y reducida capacidad de los suelos para retenerlo por otros mecanismos. En la Figura 6, se representan esquemáticamente estos procesos.



[1] *Meteorización*: alteración física y química de los minerales. Entre sus consecuencias se pueden mencionar la formación de otros minerales, liberación de nutrientes como calcio, magnesio, fósforo, potasio, etc.

[2] *Mineralización*: descomposición de la materia orgánica del suelo con la consiguiente liberación de sus componentes (entre ellos nitrógeno, azufre)

[3] *Adsorción*: proceso por el que los iones quedan atraídos electrostáticamente sobre partículas cargadas del suelo

[4] *Lixiviación*: movimiento de elementos disueltos en la fase líquida del suelo hacia capas profundas y/o napas de agua.

Figura 6. Intercambio iónico (adsorción) sobre partículas de arcilla

A título de ejemplo se ilustran en las Figura 7 y 8, los ciclos de nitrógeno y el fósforo en el sistema suelo-planta.

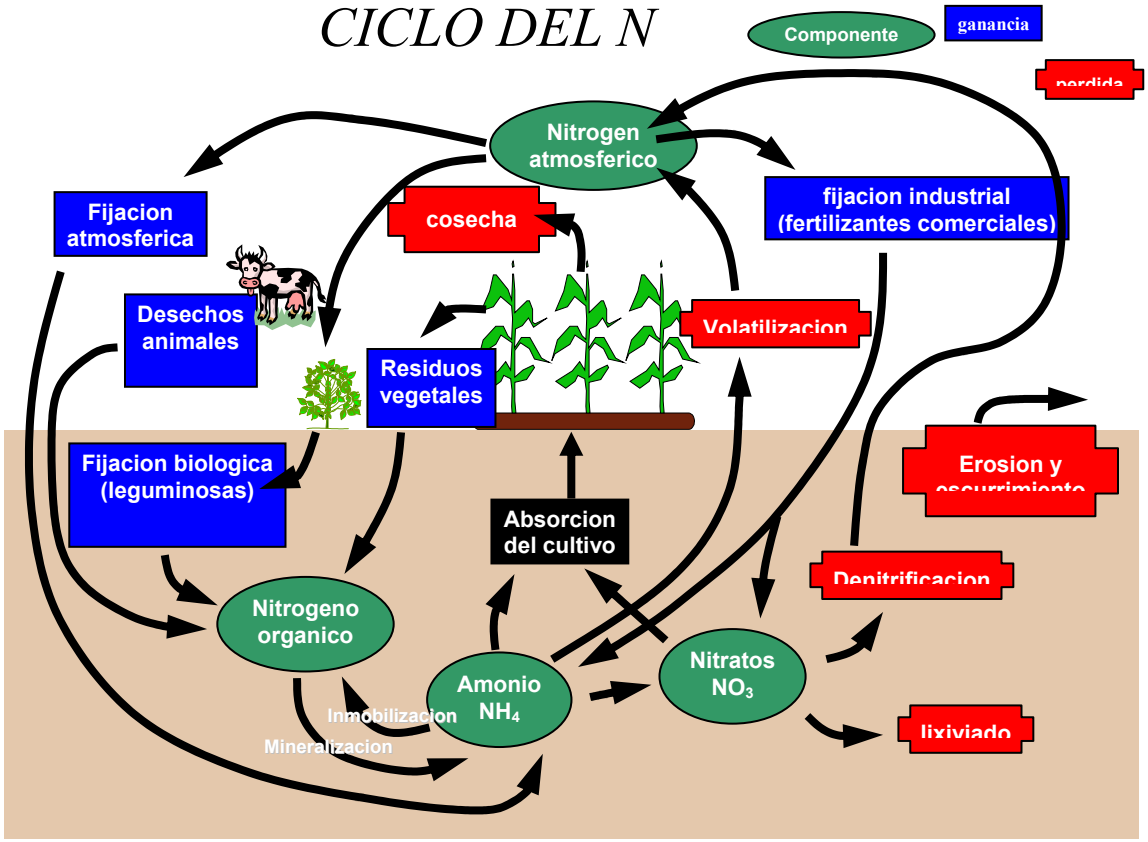


Figura 7.- Ciclo del nitrógeno (N) en el sistema suelo-planta

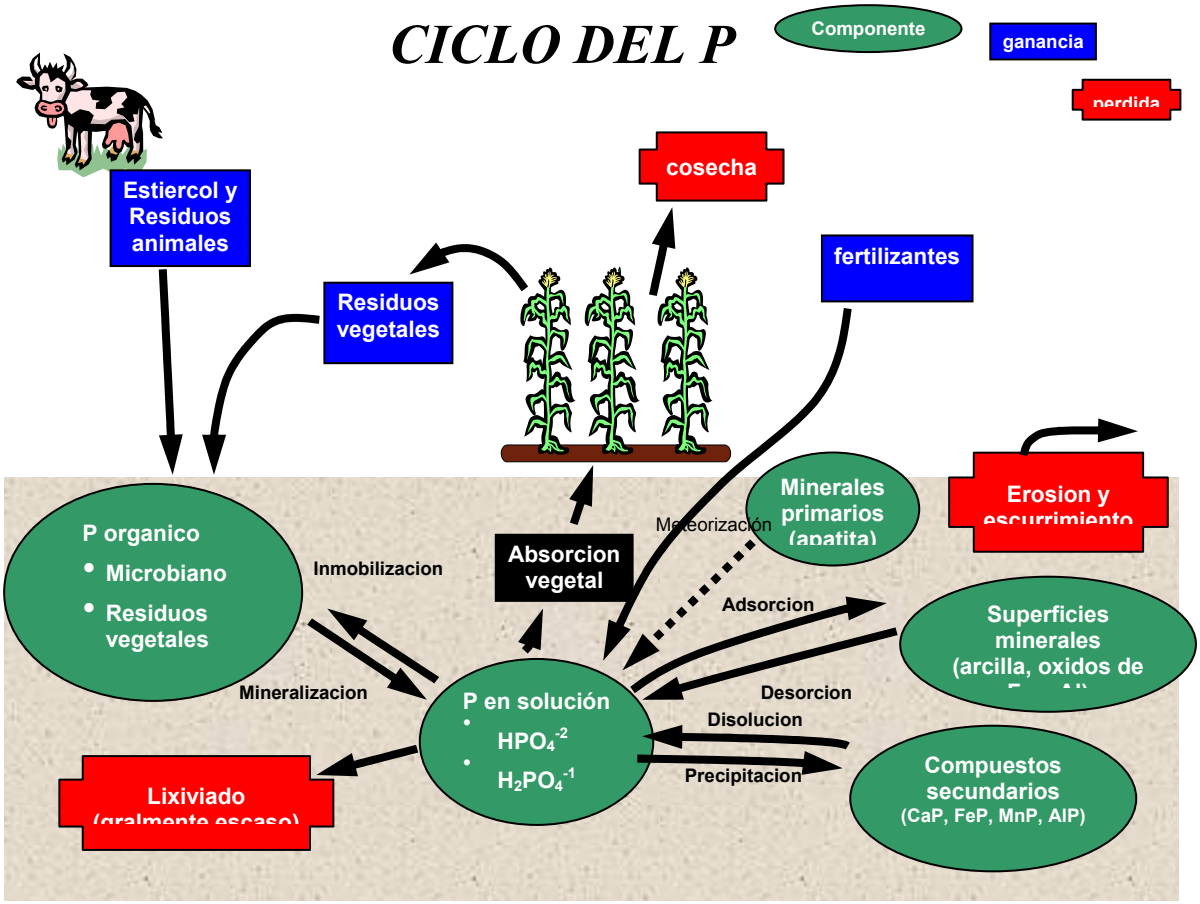


Figura 8. Ciclo del fósforo (P) en el sistema suelo-planta

Necesidad de nutrientes para las plantas

En la Tabla 3 pueden observarse los requerimientos de nutrientes para diferentes especies.

Tabla 3. Requerimientos de nutrientes (kg/t) para especies hortícolas y florícolas

Cultivo	**N**	**P**	**K**
Tomate (invernáculo)	2,5 - 4	0,22 – 0,44	2,5 – 5,8
Pimiento (invernáculo)	3 - 4	0,26 – 0,44	3,3 – 5,8
Lechuga (invernáculo)	2 – 3,5	0,26 – 1	3,3 – 5,0
Frutilla	2 - 3	0,44 – 0,66	3,3 – 4,2
Pepino (invernáculo)	0,5 – 1,6	0,31 – 0,39	2,2 – 4,0
Espinaca (invernáculo)	1,6 – 4,5	0,22 – 0,66	2,5 – 4,2
Coliflor	4 – 5	0,44 – 0,79	3,3 – 5,8
Poroto chaucha	12 – 20	1,31 – 2,62	10,0 – 20,8
Berenjena (invernáculo)	3,5 -4,5	0,35 – 0,52	3,3 – 5,8
Zanahoria	2,1	0,41	2,4
Hinojo	2,5	0,85	2,5
Cebolla verdeo	7,2	6,30	5,5
Maíz dulce	8,6	1,40	11,6
Apio	2,5 – 3,1	1,6 – 1,9	5 – 6,3
	N	**P**	**K**
		g/planta año	
Clavel	1,3 – 2,7	0,22 – 0,31	1,7 – 3,3
Rosal	4 – 6	0,44	3,3 – 5,0
Crisantemo	1 – 1,3	0,09 – 0,02	1,3 – 1,8
Gladiolo	0,4 – 0,7	0,35 – 0,52	0,8 – 1,8

Fuentes: Maroto J., 1990; Domínguez Vivancos, 1993; Camozzi M., 2007.

Debe distinguirse entre la cantidad de nutrientes necesarios para que un cultivo desarrolle normalmente y la cantidad de nutrientes que se exportan con la cosecha, pues una proporción variable, de acuerdo al órgano cosechado, volverá al suelo, a través del rastrojo y las raíces muertas. De ahí la importancia de no retirar los rastrojos o quemarlos.

FERTILIDAD DE LOS SUELOS

Ing. Agr. Mirta García- Dra. Mabel Vázquez

Definiciones

El concepto de fertilidad se enfoca desde criterios muy diversos y complementarios que en la mayoría de los casos se apoyan en aspectos relacionados con el propio suelo, con el cultivo, con la economía e, incluso con las relaciones sociales.

Un **suelo fértil** es aquel que provee los nutrientes y características generales para el normal desarrollo de las plantas. Para ello, además de los nutrientes deben darse otras condiciones tan importantes, o a veces más importantes que los propios nutrientes, como son las condiciones físicas de los suelos, su porosidad, capacidad de retención de agua, aireación, entre otras, así como otras condiciones que hacen a la posibilidad de un adecuado crecimiento, como salinidad, toxicidad de ciertos elementos, etc. Tanto la cantidad de nutrientes como la evaluación de cada una de las propiedades enunciadas cambia con el cultivo que se pretende implementar, por sus exigencias y tolerancias. Por estos motivos, los criterios relacionados con el suelo se complementan con los que tiene en cuenta el cultivo.

Cuando se analiza la fertilidad en relación con el cultivo, se tiende más a considerar la aptitud de los suelos para ser utilizado bajo diferentes sistemas de explotación. La agricultura intensiva como la horticultura y la floricultura, constituyen actividades de mayor requerimiento de la fertilidad de los suelos. La agricultura extensiva, la ganadería de engorde y de cría son una secuencia de mayor a menor requerimiento de condiciones de fertilidad, dentro de las actividades extensivas.

Entre los criterios económicos utilizados para caracterizar la fertilidad del suelo, el que se maneja más frecuentemente es el de la productividad. En general se considera un suelo fértil al que más produce, en pocas ocasiones se recurre al concepto de calidad de los productos obtenidos. Pero ambos criterios son indisociables: la fertilidad de un suelo se mide por *su capacidad de proporcionar elevados rendimientos de alta calidad.* Otro aspecto a considerar sería el relacionado con los costos de producción, un suelo es fértil si puede cultivarse con bajos aportes de fertilizantes y/o enmiendas y bajo costo energético y de infraestructura.

Dentro del ámbito social, un suelo fértil es el que permite un reconocimiento del trabajo de agricultor que ve premiado su esfuerzo con cosechas abundantes y a su vez el productor conserva esa fertilidad porque considera al suelo el patrimonio más importante para dejar a sus hijos y las generaciones futuras.

En la Tabla 4 se resume los criterios utilizados con mayor frecuencia en la caracterización tradicional de la fertilidad de los suelos:

Tabla 4. Criterios para la caracterización de la fertilidad de los suelos

Edáficos	a. Aspectos biológicos del suelo
	b. Contenido en nutrientes asimilables
	c. retención de agua
	d. aereación
	e. poder sostén
	f. ausencia de sustancia fitotóxicas
	g. ausencia de salinidad y sodicidad
De cultivo	a. Aptitud para determinado uso

	b. Estabilidad frente a la degradación
Económicos	a. Productividad (calidad y cantidad)
	b. Costos de producción
	c. Mantenimiento de la producción
Sociales	a. Reconocimiento del trabajo del productor
	b. Elemento patrimonial

Fuentes: Terrón, P., Cornejo, J. y A. Cerdá, 1998.

Diagnóstico de la fertilidad edáfica para el N y el P

Desde el punto de vista edáfico, como se ha visto en los párrafos precedentes, la fertilidad comprende dos conceptos: *la dotación*, que consiste en la provisión de nutrientes y *el abastecimiento,* que engloba aquellas características que pueden afectar el crecimiento de las plantas, tanto de naturaleza física (compactación, retención hídrica, aereación) como químicas (salinidad, sodicidad, toxicidad)

A su vez, la provisión de nutrientes (dotación) queda definida por 3 parámetros:

- ***Capacidad,*** reserva lábil del nutriente
- ***Intensidad,*** forma asimilable del nutriente
- ***Renovación,*** procesos que transforman capacidad e intensidad

Para el caso particular del nitrógeno (N) si se quiere diagnosticar la fertilidad nitrogenada del suelo, se utilizan las mediciones de estos 3 parámetros, aislados o combinados.

Capacidad del N*:* la gran mayoría del N del suelo se encuentra como constituyente de la materia orgánica (90-98%).

***Intensidad del N*:** se mide la fracción que puede acumularse en la solución del suelo y es escasamente retenida por la parte sólida del mismo. En el caso del N, el contenido de nitratos se ha empleado en gran cantidad de trabajos como una estimación de la fertilidad nitrogenada de un suelo, y consecuentemente como guía para una recomendación de fertilización. Para su utilización se deben tener ciertos recaudos, a saber:

a) variabilidad en la distribución horizontal del contenido de nitratos
b) evaluación de todo el perfil, por su posibilidad de lixiviación
c) evitar alteraciones por el acondicionamiento de la muestra (traslado refrigerado y en corto plazo)

***Renovación de N*:** se refiere a la medida del poder de mineralización de la materia orgánica del suelo puesta en condiciones óptimas de incubación. Esta medida es poco utilizada en diagnósticos de rutina

Para el caso particular del fósforo (P), la dotación está representada por:

- ***Capacidad del P,*** fosfatos precipitados y contenidos en la materia orgánica. En suelos ácidos, también los fosfatos adsorbidos.
- ***Intensidad del P,*** fosfatos en la solución del suelo
- ***Renovación del P,*** solubilización de fosfatos y mineralización de materia orgánica, principalmente. Desorción de fosfatos en suelos ácidos.

La fertilidad fosforada es medida, en la actualidad, a través de técnicas llamadas, en general, "P extractable". En dichas técnicas, mediante el empleo de soluciones extractantes de distinta naturaleza según el suelo, se extraen los fosfatos precipitados más solubles, aunque en general también se evalúa el P en solución y en algunos casos el P adsorbido, ya que no son lo suficientemente específicos como para identificarlos en forma aislada. Sin

embargo, tal vez debido precisamente a esto es que son de buena capacidad predictiva, si los extractantes son elegidos criteriosamente, ya que constituyen una evaluación de un pool lábil más que de una determinada fracción.

CARACTERÍSTICAS DEL CLIMA Y SUELOS DEL CORDÓN HORTÍCOLA DEL GRAN LA PLATA

Ing. Agr. Mirta García – Dra. Mabel Vázquez

Extraído de Análisis ambiental del Partido de La Plata. Instituto de Geomorfología y Suelos. 2006. Ed. CFI, Municipalidad de La Plata.

Ubicación geográfica

El area de descripción se ubica al NE del la Pcia. de Buenos Aires, limitando al NE con los Partidos de Ensenada y Berisso, al NO con los de Berazategui y Florencio Varela, al SO y S con San Vicente y Crel. Brandsen, y al SE con Magdalena. Ocupa una superficie de 893 km^2 (lat 34º 50´- 35º 30´; long 57º 45´- 58º 20´)

Características climáticas

La temperatura media anual es de 16,2 ºC, siendo el mes más cálido enero (22,8 ºC) y julio el mes más frío (9,9 ºC).

La distribución estacional de las lluvias es bastante regular, aunque se produce una disminución apreciable en invierno. La precipitación media anual (series 1909-2005) es de 1040 mm, siendo el mes más lluvioso marzo (111 mm) y el menos lluvioso junio (63 mm).

La intensidad media anual de los vientos es de 12 km/h, predominando los provenientes del E y secundariamente los de NE y NO. Las mayores intensidades se dan en octubre, diciembre y enero, con valores medios de 15 a 17 km/h.

La humedad relativa media anual es de 77%, variando entre 85% (junio) y 70% (enero).

Los datos de temperatura y precipitación permitieron elaborar el balance hídrico medio mensual según el método de Thornthwaite y Mather (1957), calculando la capacidad hídrica del suelo en 200 mm.

El balance permite apreciar la existencia de un pequeño déficit de agua en el suelo durante el verano y un exceso entre fines de otoño y principios de primavera.

Topografía

La topografía general del partido de La Plata y su área de influencia permite delimitar zonas geomorfológicas totalmente diferentes, tales como la *Llanura Costera* y la *Llanura Alta*.

La primera ocupa pequeños sectores hacia el Norte, en su límite con el partido de Ensenada y hacia el E cerca de los partidos de Berisso y Magdalena. Se extiende aproximadamente entre la cota de 5 m snm y la costa del Río de La Plata. Son sectores deprimidos, en algunos casos con drenaje anárquico. La Llanura Costera se vincula con la Llanura Alta a través de un escalóntiguo , en parte disimulado hoy por la erosión y la actividad antrópica.

La Llanura Alta comprende casi toda el área que nos interesa. Está dividida en dos partes con características bien diferenciadas de relieve y suelo, drenando hacia el Río de la Plata hacia el N y al río Samborombón hacia el S.

De acuerdo a los materiales que han dado origen a estos suelos, se distinguen dos ambientes contrastantes: el área *continental* con suelos desarrollados a partir de sedimentos eólicos y fluviales (loes), que abarca la mayor parte del partido de La Plata y el área de *la*

planicie costera, con sedimentos aportados por ingresiones marinas. Entre ambos ambientes existe una zona de transición en la que los suelos han evolucionada a partir de materiales de origen mixto.

Principales suelos

En la vertiente del Río del La Plata predominan suelos bien drenados, en los cuales el clima y la vegetación han desempeñado un papel importante en su origen, aunque también hay cierta influencia de los materiales de texturas finas. En la vertiente del río Samborombón ha tenido una participación importante el factor relieve, que en gran parte de la cuenca es plano o cóncavo, lo que ha contribuido a la formación de muchos suelos con excesos de agua (hidromórficos) y/o sodio (sódicos).

Los suelos bien drenados pertenecen taxonómicamente (Soil Survey Staff, 1999) principalmente a los órdenes Molisol[5] y Vertisol[6]. Son suelos con perfiles de fuerte desarrollo, con horizontes A oscuros, generalmente profundos y bien provistos de materia orgánica, a los que subyacen horizontes B con marcados movimientos descendente de arcillas (iliviación), acompañados, especialmente en los Vertisoles, por evidencias de expansión y contracción de los materiales. Son suelos con elevada capacidad de adsorción de elementos como calcio, magnesio y potasio, entre otros (capacidad de intercambio catiónico), aportada por la materia orgánica y la arcilla.

En las planicies de inundación de arroyos, en cañadas y en áreas planas de la cuenca del río Samborombón, los suelos pertenecen en muchos casos a los Alfisoles[7] o bien a Molisoles y Vertisoles con régimen ácuico (suelos con drenaje deficiente o napa freática cercana a la superficie).

En la planicie costera y en la zona de transición los suelos muestran menor desarrollo que los del área continental, especialmente por la menor edad de los sedimentos. Además, en muchos de los suelos los procesos de alcalinización y salinización han tenido una participación importante, a los que se suman en casi todos los casos, los procesos hidromórficos en razón de las posiciones deprimidas que ocupan estos suelos de la planicie costera. En los ambientes citados predominan Alfisoles y Vertisoles, algunos Molisoles y, en el caso de los suelos de menor desarrollo, los Entisoles[8].En el Anexo 1 puede verse el mapa de suelos de la región extraído de *Análisis ambiental del Partido de La Plata. Instituto de Geomorfología y Suelos. 2006. Ed. CFI, Municipalidad de La Plata.*

En l Tabla 5 se señalan las principales las unidades taxonómicas y las capacidades de uso de las unidades cartográficas presentes en el mapa señalado.

Tabla 5. Unidades taxonómicas y las capacidades de uso de las unidades cartográficas

Unidad Cartográfica	Unidades Taxonómicas	Subclase Capacidad de Uso
EC	Asociación Series Estancia Chica (80%) y Los Hornos (20%)	I-2
AS	Consociación	I-2

[5] Molisol, suelo cuyas características principales son: horizonte superficial oscuro, de buen contenido de materia orgánica, no masivo ni duro, y con buena saturación de bases hasta profundidades superiores al metro.

[6] Vertisol, suelo cuyas características principales son: más de 30% de arcilla hasta los 50 cm de profundidad, mayormente de tipo expandente, propenso al agrietamiento en épocas de sequía

[7] Alfisol, suelo cuyas características principales son: un horizonte superficial semejante al Molisol pero de escaso espesor y uno subsuperficial rico en arcilla y a veces sodio.

[8] Entisol, suelo con muy escaso desarrollo, y diferenciación en horizontes.

AS3	Serie Arturo Seguí Complejo Serie Arturo Seguí (60%) Serie Gorina (40%)	IIs
Go	Consociación Serie Gorina	IIs
AS-Go	Complejo Series Arturo Seguí y Gorina (70%) Albacualfes vérticos (20%) Serie Esquina Negra (10%)	IIIws
LH	Consociación Serie Los Hornos	IVws
Nv2	Complejo: Natracualfes vérticos (60%) Serie Arturo Seguí, fase imperfectamente drenada y Albacualfes vérticos (40%)	VIews

Asociación: es una unidad cartográfica donde están presentes dos o más suelos diferentes pero su distribución permite que en un mapa más detallado (escala mayor) se los puedan separar

Clases y subclases de capacidad de uso:

- Tierras aptas para todo tipo de cultivos
  - Clase I (sin limitaciones)
  - Clase II (ligeras limitaciones)
  - Clase III (moderadas limitaciones)

- Tierras aptas para cultivos limitados
  - Clase IV (severas limitaciones)
- Tierras generalmente no aptas para cultivos
  - Clase V (dificultad de maquinaria)
  - Clase VI (praderas naturales con posibles mejoras)
  - Clase VII (pasturas naturales)
  - Clase VIII (fauna, vida silvestre)

Subclases:
- e = erosión
- w = drenaje deficiente
- s = limitaciones en la zona radicular
- c = limitaciones climáticas

Complejo: es una unidad cartográfica donde están presentes dos o más suelos diferentes que por la complejidad de su distribución no permite separarlos

Consociación: es una unidad cartográfica donde domina un solo suelo que se agrupa con otros similares (50 a 75%) pudiendo incluir suelos diferentes (25%).

Serie de suelo: una serie es un grupo homogéneo de suelos desarrollados sobre un mismo material originario y donde la secuencia de horizontes y demás propiedades son suficientemente similares a las de su perfil modal o concepto central. Dentro de cada serie se admite una pequeña gama de variabilidad, siempre que no se aparte significativamente de

su concepto central. Por lo tanto, los individuos que forman una serie son esencialmente homogéneo en sus caracteres importantes.

Unidad Cartográfica (U.C.): representa un sector el terreno ocupado por uno o más suelos que pueden diferir en contraste, forma y tamaño de la superficie que ocupan dentro de la unidad.

Unidad Taxonómica (U.T.): es un agrupamiento de suelos realizado en función de un conjunto de propiedades similares entre las mismas. El número y naturaleza de estas propiedades depende del Sistema de Clasificación adoptado y del nivel elegido dentro del mismo. El Sistema Soil Taxonomy consta de seis niveles o categorías: Órdenes, Subórdenes, Gran Grupo, Subgrupo, Familia y Serie.

Breve descripción de las principales series de suelos

Serie Arturo Seguí: Argiudol vértico, familia fina, montomorillonitica, térmica.

Se ubica generalmente en interfluvios y pendientes de la vertiente del río de la Plata. Incluye suelos de fuerte desarrollo, moderadamente bien drenados, de permeabilidad lenta o muy lenta. Tienen horizontes A franco limosos o franco arcillo limosos con 25-30 % de arcilla y espesores de 20-30 cm. Generalmente subyace un horizonte de transición BA. Continúa un Bt de 65-85 cm de espesor, textura arcillosa o arcillo limosa, con valores de arcilla de 50-60% que llega hasta una profundidad de 90-110 cm. Por debajo se encuentran horizaontes de transición BC arcillo limosos, frecuentemente con acumulación de carbonato de calcio en la masa o en concreciones. Tienen algunas veces rasgos hidromórficos débiles (moteados) debido a la lenta permeabilidad del horizonte B. Al igual que en otros suelos de la región los rasgos vérticos están bien expresados, particularmente las superficies de deslizamiento (slickensides) que generalmente son más abundantes y extensos en los subhorizontes Bt más profundos y grietas con chorreaduras de materia orgánica. La serie Arturo Seguí tiene semejanzas con la serie Estancia Chica, diferenciándose de ésta por la mayor cantidad de arcilla y familia mineralógica. Se diferencia de la serie Gorina por la menor cantidad de arcilla del horizonte A que la excluye del orden Vertisol.
Son suelos de buena fertilidad química, estando bien provistos de materia orgánica y N. Presentan algunas deficiencias en su drenaje interno derivadas de la lenta permeabilidad del horizonte B. La elevada capacidad de contracción-expansión puede originar problemas en las raíces de las plantas y en construcciones. Posee una Capacidad de uso I-2.

Serie Estancia Chica, Argiudol vértico, familia fina, illítica, térmica

Se encuentra enel Interfluvio plano de la divisoria principal entre las cuencas de los ríos de la Plata y Samborombón. Son suelos de fuerte desarrollo, bien a moderadamente bien drenados, de permeabilidad lenta. El horizonte superficial es generalmente de textura franco limosa, con tenores de arcilla de 20-25 % y espesor de 20-30 cm. Por debajo suele aparecer un horizonte de transición AB o bien el horizonte A apoya directamente sobre un horizonte Bt. Este horizonte tiene 60-90 cm de espesor, llegando a una profundidad algo superior a 1 metro, posee textura arcillosa (45-55 % de arcilla) y rasgos vérticos bien expresados. La transición hacia el material originario es gradual, existiendo generalmente dos horizontes BC, a veces con acumulaciones de carbonato de calcio. El solum tiene entre 150 y 200 cm de espesor. Se ha detectado algunas veces la presencia de un horizonte B enterrado por debajo de los horizontes BC.

Son suelos de buena aptitud agrícola. Tienen algunas deficiencias de drenaje derivadas del relieve plano en que se encuentran frecuentemente y de la textura arcillosa del horizonte B.

Serie Gorina, Hapludert típico, familia fina, montmorillonítica, térmica

Se ubica en interfluvios convexos y pendientes de la vertiente del río de la Plata. Son suelos profundos, moderadamente bien drenados, de permeabilidad lenta o muy lenta. Poseen un horizonte A oscuro de 20-30 cm de espesor que puede presentar moteados en razón de la saturación con agua producida por la menor permeabilidad de los horizontes subyacentes. Tiene textura franco arcillo limosa, con tenores de arcilla de 32-40 %. Suele aparecer por debajo un horizonte de transición AB de textura arcillo limosa. Poseen un horizonte Bt de 80 a 100 cm de espesor, subdividido casi siempre en tres subhorizontes, con 50-60 % de arcilla. Le subyace un horizonte de transición BC de textura arcillo limosa o franco arcillo limosa con concentraciones de carbonato de calcio en concreciones y en la masa que llega hasta cerca de los 2 metros. Se observan superficies de deslizamiento grandes y entrecruzadas que delimitan bloques angulares cuneiformes. En épocas de déficit hídrico presentan grietas anchas que pueden llegar hasta la superficie, se visualizan como chorreaduras oscuras que se extienden a través del horizonte B, originada por caídas del horizonte A. Las labores agrícolas experimentan algunas dificultades pues la consistencia es muy dura en seco y adhesiva o muy adhesiva en mojado, siendo estrecho el margen de humedad óptimo para el laboreo. Los suelos de esta clase fueron asignados a la subclase de capacidad de uso IIs.
En la Tabla 6 se muestran las propiedades químicas y modificaciones que ocurren en algunos suelos de la región.

Tabla 6 Características químicas de algunos suelos de la zona hortícola platense

Zona	**pH**	**CE**	**Ct**	**Mat. org.**	**N Total**	**P asimilable**	**K**	**Ca**	**Mg**	**Na**

		dS/m	(%)	(%)	(%)	(ppm)	(meq/100g)			
Estancia Chica (invernáculo)	6,2	0,12	2,26	3,91	0,201	236	1,84	14,4	3,16	
Estancia Chica (campo natural)	5,3	1,12	3,24	5,59	0,25	8,1	1,2	15,1	1,1	0,3
Colonia Urquiza (invernáculo)	6,8	0,37	2,56	4,4	0,24	140	1,4	13,1	5	2,3
Villa Elisa (cultivo a campo)	6,7	2,9	1,17	2,01	0,154	63	0,6	26,0	0,6	0,09
Arturo Seguí (cultivo a campo	7,9	1,2	2,12	3,65	0,206	86	0,94	13,6	3,91	0,21
Arana (invernáculo)	8,4	1,2	2,29	3,95	0,237	249	1,5	27,7	6,18	
Gorina (invernáculo)	7,3	0,85	1,85	3,2	0,16	215	1,65	13,9	1,24	
Gorina (campo natural)	5,6	1,44	2,55	4,40	0,228	8,2	1,2	8,3	3,8	0,2
Hernández (cultivo a campo)	7,2	1,2	1,52	2,63	0,13	24	0,64	12,5	1,65	

Fuente: Ing. Agr. Luis Balcaza. El cinturón verde del Gran Buenos Aires

En la tabla precedente se puede observar la tendencia hacia el aumento de pH, fósforo, sodio, conductividad eléctrica y magnesio, mientras que la materia orgánica y el nitrógeno tenderían a disminuir en situaciones de cultivo. Sin embargo, la principal modificación de los suelos se produciría en sus propiedades físicas, debido, fundamentalmente al laboreo intenso

MUESTREO Y DIAGNÓSTICO

Dra. Mabel Vázquez

Para hacer un correcto diagnóstico de condiciones de fertilidad química, como por ejemplo necesidad de fertilización, elección del tipo de fertilizante y su dosis, problemáticas de salinidad o sodicidad, es necesario realizar análisis químicos ya sea sobre el suelo o el vegetal. Estos análisis no son excluyentes, en general la realización de ambos permite mejorar el diagnóstico. A continuación se darán algunas pautas para el muestreo del suelo y el vegetal.

Suelos

Es muy importante que la muestra que analice el laboratorio sea representativa del área en estudio, por lo que las instrucciones de toma de muestra se deben cumplir con sumo cuidado, ya que si la misma no es representativa del lote o del invernáculo, es imposible dar una buena recomendación. Para realizar el trabajo de toma de muestras de suelo se debe tener en cuenta los siguientes puntos:

1.- Herramientas
2.- Profundidad
3.- Forma de extracción
4.- Acondicionamiento
5.- Identificación
6.- Epoca de muestreo
7.- Precauciones especiales

1.- Herramientas: requieren 2 condiciones
a) que tome una capa uniforme desde la superficie
b) que obtenga el mismo volumen de suelo cada vez que se usa
En general los barrenos tubulares cumplen muy bien estas condiciones (Figura 9). También se puede utilizar una pala, clavándola a la misma profundidad en sentido vertical y tomando como muestra la parte central del material (Figura 10(a)).

Figura 9. Muestreo de suelo con barreno para formar una muestra compuesta.

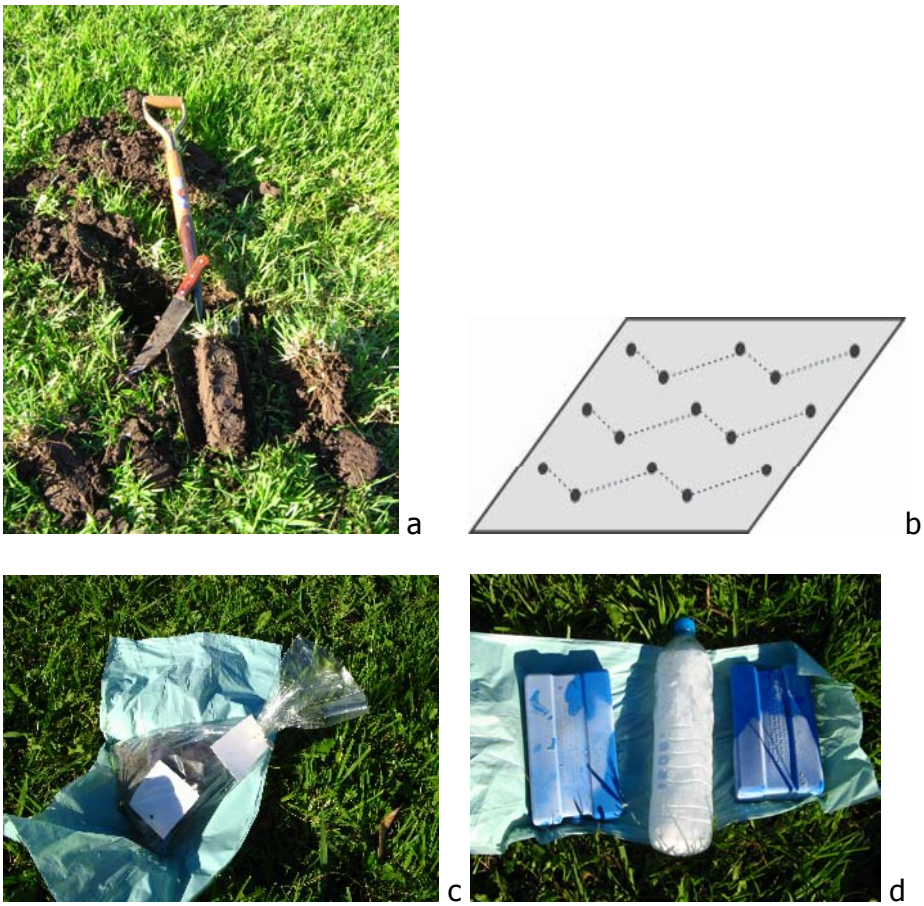


Figura 10.a) Muestreo de suelo con pala, sacando porción central de la palada, b) diagrama de zig-zag para la extracción, c) embolsado con rótulo y d) refrigerantes para el traslado.

2.- Profundidad: se debe tener en cuenta el objetivo del análisis, la zona de mayor densidad de raíces y la naturaleza del cultivo (anual o perenne) y proceder conforme a ello. A título de ejemplo, en el caso en que se vaya a determinar nitratos o problemáticas ligadas

a la salinización/sodificación, la profundidad de muestreo debe ser de 0-20, de 20-40 y de 40-60 cm, por separado. Si el objetivo es determinar fósforo se debe muestrear en los primeros 15 cm de suelo.

3.- Formas de extracción: el lote de donde se toma la muestra debe ser homogéneo en cuanto a características de suelo, relieve (muestrear por separado loma, media loma y bajo), cultivos antecesores, fertilizaciones o enmiendas previas, etc. En el caso de invernáculos no deben mezclarse muestras de diferentes invernáculos. Se recorre el área a muestrear en zigzag (Figura 10 (b)), tomando una porción de suelo (submuestra) en cada parada y componiendo con todas las submuestras una muestra compuesta. De manera orientativa, pueden tomarse 10 submuestras por sector de la quinta o invernáculo a evaluar. No deben mezclarse las distintas profundidades. Las submuestras se tomarán preferentemente en zig-zag siguiendo la diagonal para evitar superponerse con la misma línea de siembra, riego o fertilizaciones previas. Las submuestras se colocarán en un balde plástico, se mezclarán bien, para de allí extraer alrededor de 1 kg de muestra compuesta y enviarla al laboratorio.

4.- Acondicionamiento: en general las muestras pueden remitirse al laboratorio a temperatura ambiente. Sin embargo, si el objetivo es determinar nitratos, debe ser remitida refrigerada (pueden utilizarse heladeras de tergopol con congelantes para vacunas) (Figura 10 (d)) y lo antes posible al laboratorio, a los fines de evitar alteraciones. En este último caso, debe solicitarse al laboratorio su análisis en húmedo, manteniendo la cadena de frío.

5.- Identificación: se aconseja colocar la muestra en doble bolsa de plástico y, entre ambas, la tarjeta identificatoria en la que se consignará nombre del establecimiento, sector de la quinta o invernáculo muestreados y profundidad de muestreo (Figura 10 (c)).

6.- Época de muestreo: si el objetivo es determinar nitratos, la muestra debe tomarse lo más cerca posible de la fecha de fertilización. Considerando el tiempo que requiere el análisis en el laboratorio se recomienda tomar las muestras 10-15 días antes y enviarlas inmediatamente. Para el resto de las determinaciones es poco importante la época de muestreo. Sin embargo si se pretende hacer un seguimiento de una determinada condición química, por ejemplo fósforo, es conveniente muestrear siempre en la misma fecha del año.

7.- Precauciones: no se es recomendable tomar muestras en caminos, bajo alambrados, comederos, cerca de aguadas o cualquier otro lugar donde se concentren animales. No deben utilizarse bolsas que hayan contenido fertilizantes o semillas tratadas con órgano-fosforados. Se debe evitar muestrear después de lluvias de más de 20 mm. Las herramientas de muestreo deben limpiarse profundamente al cambiar de potrero o situación. En ningún caso debe ponerse la tarjeta identificatoria en contacto con el suelo, pues perderá la información. En lotes recientemente fertilizados aumentar el número de submuestras/muestra compuesta.

Interpretación de los resultados del análisis de suelo

Los resultados de los análisis de laboratorio practicados sobre las muestras de suelo, permiten identificar posibles deficiencias. En las Tablas 7 a 14 se listan algunos de los criterios utilizados:

Tabla 7. Calificación del contenido de C orgánico (aproximadamente % carbono x 1,72 = % materia orgánica), para el horizonte superficial.

Carbono orgánico % (Método Walkley - Black)	
< 1,5	Altamente desprovisto
1,5 - 2,5	Pobremente provisto
2,5 – 4,5	Moderadamente provisto
4,5-6,5	Bien provisto
> 6.5	Muy bien provisto

Tabla 8. Calificación del contenido de N total para el horizonte superficial

Nitrógeno total % (Método Kjeldahl)	
< 0,075	Muy deficiente
0,075 - 0,125	Deficiente
0,125 - 0,150	Moderadamente deficiente
0,150 - 0,200	Moderadamente provisto
0,200 - 0,300	Bien provisto
> 0,300	Muy bien provisto

Tabla 9. Calificación del contenido de fósforo extractable para el horizonte superficial

Fósforo extractable ppm = mg/kg (Método Bray-Kurtz)	
< 5	Muy deficiente
5 - 7,5	Deficiente
7,5 - 12	Moderadamente deficiente
12 - 20	Moderadamente provisto
20 -30	Bien provisto
> 30	Muy bien provisto

Tabla 10. Calificación del pH actual

pH en agua (relación 1: 2,5)	
< 4,5	Extremadamente ácida
4,5 - 5,0	Muy fuertemente ácida
5,1 - 5,5	Fuertemente ácida
5,6 - 6,0	Moderadamente ácida
6,1 - 6,5	Levemente ácida
6,6 - 6,9	Muy levemente ácida
7,0	Neutra
7,1 - 7,3	Muy levemente alcalina
7,4 - 7,8	Levemente alcalina
7,9 - 8,4	Moderadamente alcalina
8,5 - 9,0	Fuertemente alcalina
> 9,0	Muy fuertemente alcalina

Tabla 11. Calificación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC)

CIC

(meq/100 g = cmolc/kg)	
0 - 5	Muy baja
5 - 10	Baja
10 - 17	Moderada
17 – 25	Alta

Tabla 12. Rango de saturaciones básicas ideales

Elemento	Saturación (%)
Cálcica	65-85
Magnésica	6-12
Potásica	2-5

Aclaración: Un suelo fértil posee entre el 75 y 90 % de saturación (S)
S (%) = (Ca + Mg + Na + K intercambiables) x 100 / CIC

Tabla 13. Calificación de la saturación cálcica

Saturación Cálcica = Ca x 100/S (%) (Método $AcNH_4$)	
< 40	Muy baja
40 – 60	Baja
60 – 75	Moderada
75 – 85	Buena
> 85	Muy buena

Tabla 14. Calificación de la saturación magnésica

Saturación Magnésica= Mg x 100 /S (%) (Método $AcNH_4$)	
< 7	Baja
7 – 10	Algo baja
10 – 15	Moderada
15 – 20	Buena
20 – 30	Elevada
> 30	Excesiva

Vegetal

El muestreo de los vegetales debe hacerse en momentos del ciclo del cultivo determinados. De la misma manera, el órgano a muestrear en general, ya ha sido establecido por experiencias de investigación en el país o el extranjero. Para especies hortícolas se recomienda de 40-50 muestras/sitio a diagnosticar.

A titulo de ejemplo, se consignan en la Tabla 15 algunos criterios para distintos cultivos hortícolas.

Tabla 15. Guía para el muestreo del vegetal en especies hortícolas

Cultivo	**Momento de muestreo**	**Parte a muestrear**
Calabaza	Inicio de la floración	Pecíolo de la hoja madura más joven
Lechuga	Formación de la cabeza	Hojas maduras jóvenes
Brócoli	Mitad del ciclo	Nervadura principal de hojas maduras jóvenes
Zanahoria	Mitad del ciclo	Nervadura principal de hojas maduras jóvenes
Coliflor	botonamiento	Nervadura principal de hojas maduras jóvenes
Espinaca	Mitad del ciclo	Hojas maduras jóvenes
Pepino	Primeros frutos	Pecíolo de la 6º hoja a partir de la punta
Pimiento	Floración	Hojas maduras jóvenes
Repollo	Formación de la cabeza	Hojas maduras jóvenes
Tomate	Floración o 1er fruto maduro	4º hoja a partir de la punta

Fuente: Malavolta et al, 1989

Interpretación de resultados del análisis vegetal

En las Tablas 16 y 17 se consignan algunos valores de referencia para la evaluación de los análisis foliares de macro y micro elementos, respectivamente.

Tabla 16. Rangos de suficiencia del contenido total de los distintos nutrientes en el vegetal, según el órgano de muestreo sugerido en Tabla 15 .

Cultivo	**N**	**P**	**K**	**Ca**	**Mg**	**S**

			%			
Calabaza	15000 ($N\text{-}NO_3^-$ ppm)	16000 ($P\text{-}PO_4^-$ ppm)	10			
Lechuga	3	0,35	5	1,25	0,35	0,25
Brócoli	9000 ($N\text{-}NO_3^-$ ppm)	4000 ($P\text{-}PO_4^-$ ppm)	5			
Zanahoria	7500 ($N\text{-}NO_3^-$ ppm)	3000 ($P\text{-}PO_4^-$ ppm)	6	2,25	0,35	0,40
Coliflor	7000 ($N\text{-}NO_3^-$ ppm)	3500 ($P\text{-}PO_4^-$ ppm)	4	1,5	0,4	1,25
Espinaca	4	0,4	6	1	1	0,3
Pepino	7500 ($N\text{-}NO_3^-$ ppm)	2500 ($P\text{-}PO_4^-$ ppm)	5			
Pimiento	3,5	0,25	2,5	2,5	0,75	0,40
Repollo	8000 ($N\text{-}NO_3^-$ ppm)	3000 ($P\text{-}PO_4^-$ ppm)	5			
Tomate (pecíolo)	3	0,35	4	1,4-1,8	0,4	0,3

Fuente: Malavolta et al, 1989

Tabla 17. Rango de micronutrientes ideales

Cultivo	**Boro (B)**	**Cobre (Cu)**	**Hierro (Fe)**	**Manganeso (Mn)**	**Molibdeno (Mo)**	**Zinc (Zn)**
			ppm = mg/kg			
Hortícolas						
Coliflor	60-80	8-10	120-140	50-70	0,40-0,80	30,50
Espinaca	30-40	10-15	300-400	200-250		100-120
Repollo		15-20	80-100	25-40		30-40
Tomate	50-70	10-15	500-700	250-400	0,30-0,50	60,70
Florícolas						
Crisantemo	25-75	10-50	90-3000	50-300		15-200
Azalea	25-75	6-25	50-250	40-200		20-200
Rosa	30-60	7-25	60-200	30-200	0,10-0,90	18-100
Hortensia	20-50	6-50	50-300	50-300		20-200
Clavel	30-100	8-30	50-200	50-200		25-200
Boungainvillea	25-75	8-50	50-300	50-200		20-200

Fuente: Scheid Lópes, 2005

PROBLEMÁTICAS DE ÍNDOLE QUÍMICA EN LOS SUELOS

Dra. Mabel Vázquez

Nutrientes

Como se ha visto en los capítulos anteriores, las plantas tienen requisitos específicos de nutrientes para su desarrollo. Algunas de sus funciones pueden verse en el esquema de la Figura 11.

Figura 11. Efecto de una correcta nutrición sobre la fisiología de los cultivos

Los diferentes suelos poseen, de acuerdo a los materiales minerales que les dieron origen y la evolución que hayan sufrido, cualidades naturales de fertilidad química. Es decir que, el contenido de nutrientes depende en primera instancia del tipo de suelo. En áreas productivas, sobre este contenido natural, el hombre ha ejercido modificaciones, en general, tanto mayores cuanto más antigüedad tiene la práctica productiva. La cosecha de los cultivos significa siempre una exportación de nutrientes (Tabla 3), es decir un empobrecimiento. Casi la totalidad de los nutrientes carecen de reposición natural en el suelo. El fósforo o el calcio que se cosechan junto con la producción de tomate, a título de ejemplo, significa siempre un balance negativo de estos elementos en el suelo. Es decir, para la mayoría de los nutrientes, los suelos poseen un contenido natural que se pierde paulatinamente con la producción. Una excepción a esto, es el nitrógeno. Este elemento es muy abundante en el aire y existen microorganismos en el suelo que son capaces de tomarlo del aire del suelo en equilibrio con la atmósfera externa, incorporarlo a sus estructuras y de esa manera, contribuir al contenido de nitrógeno del suelo. Muchos de estos

microorganismos, especialmente los más eficientes, son simbióticos, es decir viven asociados a plantas con las cuales logran beneficios mutuos. Dentro de las plantas, las leguminosas forman con bacterias fijadoras, asociaciones que pueden aportar cantidades importantes de este elemento al suelo (Tabla 18)

Tabla 18. Nitrógeno fijado simbióticamente en distintos cultivos de leguminosas

Cultivo	N Fijado (kg N/ha)
Alfalfa	114-300
Trébol rojo	115
Trébol blanco	93-143
Vicia	80
Soja	51-195
Arveja	70
Maní	40

La simbiosis puede propiciarse a través de la inoculación de las semillas con las bacterias fijadoras, lo que constituye una práctica habitual en la agricultura extensiva. Por lo dicho, la única forma de mantener la fertilidad del suelo, para todos los nutrientes, con la excepción del nitrógeno, es el aporte de nutrientes mediante fertilizantes inorgánicos o enmiendas orgánicas que los contengan (ambos ítems serán tratados en apartados especiales en este manual).

Ocurre con mucha frecuencia que la fertilización no se maneja con pautas criteriosas, en cuanto a la elección del tipo de fertilizante a aplicar, es decir el/los elemento/s aportados, sus dosis o periodicidad de las aplicaciones. Este aspecto puede redundar no sólo en perjuicios para el cultivo que se está fertilizando, reduciendo el beneficio económico del uso de este insumo, si no también, en muchos casos, particularmente en la horticultura, se pueden provocar desequilibrios de nutrientes en el suelo, que en ocasiones son difíciles de revertir. Un caso bastante común en el ámbito flori-hortícola del Gran La Plata es la sobrefertilización fosforada. Como el fósforo es un elemento muy poco móvil en el suelo, agregados sobredimensionados de fertilizantes fosforados por períodos prolongados, a veces varias décadas, condujeron a ciertos suelos a contenidos tóxicos de este elemento, problema con escasas probabilidades de solución. Esto ha obligado al abandono de tierras con el consiguiente perjuicio económico, y a veces a la compra de tierra para la cobertura del suelo, lo que significa un doble perjuicio, ya que acarrea la decapitación de otra área con capacidad productiva.

Otro aspecto bastante frecuente es que aunque se hagan fertilizaciones, estas se limiten, como práctica habitual, a ciertos elementos, generalmente nitrógeno, fósforo y potasio. Esto trae como consecuencia que otros nutrientes no considerados en los planteos de fertilización o aplicados sólo esporádicamente, se vayan empobreciendo. Entre estos elementos pueden estar los denominados micronutrientes, como cobre, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, boro, entre los principales. Otros elementos generalmente con baja reposición, son el calcio y el magnesio. Como se trata de 2 nutrientes que confieren basicidad, los suelos afectados por esta pérdida padecen acidificación. La falta de calcio y magnesio tiene repercusiones directas sobre la producción. Por ejemplo, podredumbres de frutos en tomate o pimiento, pueden ser la consecuencia de falta de calcio o baja dinámica de reposición a las formas solubles de las cuales se nutren las plantas. También, esto trae aparejado problemas secundarios, como la inmovilización de otros nutrientes, tal el caso del molibdeno, la reducida actividad de microorganismo que mineralizando materia orgánica liberan nitrógeno a la solución del suelo, entre otros perjuicios. Al proceso de acifidificación también contribuye la fertilización nitrogenada, particularmente con fertilizantes de tipo amoniacal o la propia urea, pues al sufrir oxidación en el suelo, liberan hidrógeno que

aumenta la acidez, es decir disminuye el pH. La acidificación limita el tipo de cultivo que puede hacerse y repercute en los rendimientos de muchas especies productivas.

Salinización/Sodificación

Los **suelos salinos** se definen como aquellos suelos con una acumulación de sales más solubles que el yeso, la cual afecta el normal desenvolvimiento de las plantas no adaptadas. Dentro de las sales mas frecuentes pueden mencionarse a los cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos de sodio, magnesio o calcio.

Los **suelos sódicos** se caracterizan por el elevado contenido de sales sódicas, de manera de afectar el crecimiento de las plantas no adaptadas a estas condiciones, en forma directa o indirecta.

Ambas problemáticas pueden identificarse en campos naturales por vegetación característica, pero en suelos cultivados normalmente no se cuenta con este elemento de juicio. Sin embargo, la salinidad puede identificarse a través de otros rasgos a campo, como la aparición de eflorescencias blanquecinas cuando el suelo se seca, pero fundamentalmente se identifica a través del análisis del suelo. Sobre muestras de superficie y de capas subsuperficiales, se analiza la conductividad eléctrica (CE), la cual define, a ciencia cierta la existencia del problema. Es necesario hacer muestreos subsuperficiales, pues si ha ocurrido lluvia más o menos recientemente o se ha regado con láminas grandes, puede que las sales se concentren en capas a varios centímetros de la superficie. Un muestreo superficial que diera baja CE, no permitiría descartar el problema. Como se trata de sales solubles, estas sales en un período mas seco estarán en superficie y constituirán un problema para los vegetales. Una calificación de esta propiedad puede verse en la Tabla 2.

La sodicidad se puede evaluar también por apreciaciones de campo, como por ejemplo eflorescencias oscuras sobre la superficie, habitualmente conocidas como álcali negro, la apreciación de chorreados oscuros subsuperficiales o la presencia de estructuras columnares en casos extremos. Pero de la misma manera que en la salinidad, la confirmación puede hacerse mediante el análisis del suelo. En este caso se determina la "relación de adsorción de sodio (RAS)" o el "porcentaje de sodio intercambiable (PSI)". En la Tabla 19 se ilustra una calificación tentativa para el PSI. Cabe destacar que la RAS es siempre algo inferior (generalmente 2-4 unidades) que el PSI, por lo que la calificación de la RAS puede deducirse de la de PSI.

Tabla 19. Calificación de la sodicidad en base al porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

PSI %	**Calificación**
Menor de 4	Baja
4 - 8	Ligera
8 - 15	Moderada
15 - 20	Alta
Más de 20	Muy alta

La calificación en base al PSI varía según la condición textural del suelo. En general, en suelos gruesos, los valores de PSI a los que aparecen problemas son inferiores.

Los perjuicios de estas problemáticas son los siguientes:

a.- salinidad:

- disminución de la disponibilidad de agua: las sales son en general higroscópicas, es decir absorben agua, por lo que se reduce la disponibilidad de la misma para las

plantas. En estas condiciones, el suelo puede estar húmedo pero la planta sufre stress hídrico.

- toxicidad: la elevada concentración de ciertas sales produce efectos perjudiciales sobre las plantas, afectando su fisiología de diferente manera según la sal, es decir produciendo lo que genéricamente se conoce como toxicidad. A título de ejemplo puede decirse que el cloruro de magnesio o el carbonato de sodio, suelen ser sales de elevada toxicidad para muchas especies vegetales.

b.- Sodicidad:

- afectación de la estructura: la abundancia de sodio provoca la dispersión de las arcillas y la materia orgánica del suelo, por lo que el mismo pierde su arquitectura porosa natural. Esto disminuye la porosidad y a su vez cambia la distribución de los poros remanentes, disminuyen los poros grandes de drenaje y aumentan, proporcionalmente, los poros finos. Como resultante, se dificulta la evacuación de excesos hídricos, los suelos se encharcan con facilidad, permaneciendo saturados por un período de tiempo prolongado. Cuando el suelo se seca, especialmente en texturas finas, se hace cohesivo, ofreciendo gran impedancia para el crecimiento de las raíces o emergencia de plántulas. Con frecuencia se encostran.
- toxicidad: las sales sódicas suelen ser tóxicas para un elevado número de especies vegetales.

Tanto el proceso de salinización como de sodificación pueden ser naturales o provocados por la acción del hombre. En ámbitos áridos o semiáridos, la predominante circulación del agua hacia la superficie por demanda evaporatoria del suelo y transpiratoria de las plantas, así como la escasez de lluvia, provocan que las sales naturales de los suelos no se laven, por el contrario se concentren en superficie (Figura 12). En ámbitos húmedos como puede ser la Pradera Pampeana, en particular el Gran La Plata, los procesos naturales de salinización y sodificación tienen otro origen. Generalmente, los suelos afectados por estos problemas por causas naturales en este ámbito, están ubicados en las posiciones deprimidas del paisaje, en los bajos. La causa es que las lluvias provocan el lavado de estas sales de las partes más altas de la topografía, concentrándolas en los mencionados bajos (Figura 13). Esto ocurre por escurrimiento subsuperficial por sobre capas de suelo u horizontes a varios centímetros por debajo de la superficie, de menor infiltración. Las sales, una vez en los bajos, no se pierden por lavado profundo, pues en general, en estos lugares las napas están bastante cerca de la superficie.

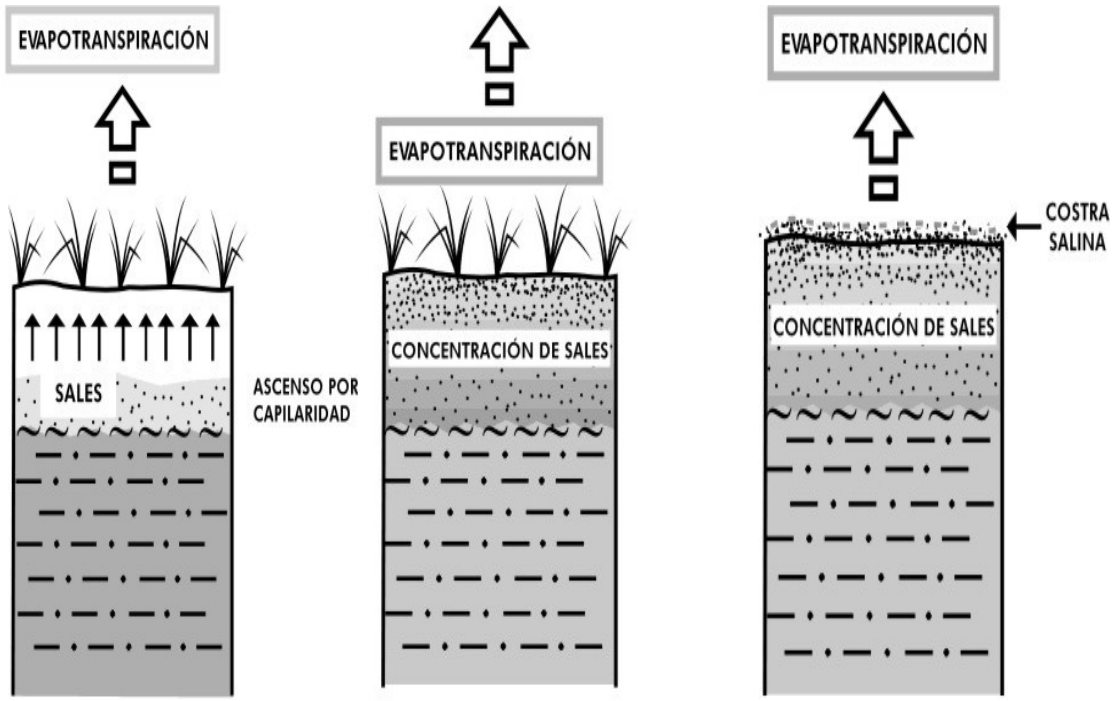


Figura 12 . Esquema de salinización en zonas áridas (Extraído de Casas R., 2003)

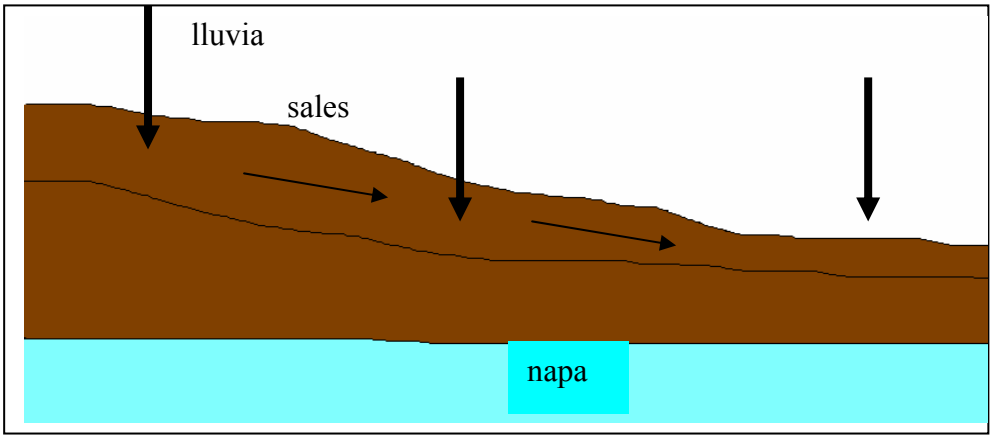


Figura 13. Movimiento de las sales hacia los bajos en zonas húmedas.

A estos procesos naturales, puede sumársele, la acción del hombre. Una de las causas más frecuentes de salinización/sodificación es el empleo de aguas de riego de baja calidad. Vastas áreas del país con producciones bajo riego, tienen graves perjuicios de salinidad o sodicidad. En general, los acuíferos a partir de donde se toma agua para riego en el Gran La Plata, padecen de la problemática de la sodicidad. Las aguas suelen tener elevado contenido de bicarbonato de sodio, sal que eleva notablemente el pH de los suelos, particularmente bajo cubierta, además de aportar sodio. A título de ejemplo se ilustran algunos resultados de análisis de aguas en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados de análisis de agua de la región platense

Zona	pH	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	CO_3H^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	RAS	CSR
Gorina (La Plata)	7,17	1,00	2,10	1,90	6,30	0,20	7,60	1,10	1,80	4,5	3,7
Hernández (La Plata)	7,20	1,02	1,10	1,60	8,20	0,20	8,50	0,94	1,50	7,1	5,8
Va. San Luis (Florencio Varela)	7,60	0,72	2,80	1,30	4,0	0,5	8,60	0,40	0,80	2,80	4,5
La Antena (Florencio Varela)	7,60	0,67	2,0	1,2	6,1	0,3	9,6	0,4	0,8	4,8	6,4
Abasto (La Plata)	7,7	0,55	1,5	0,8	5,0	0,3	7,6	0,5	1,0	4,7	5,3
Los Hornos (La Plata)	7,54	0,67	1,10	1,60	2,8	0,2	4,90	0,3	0,80	2,4	2,2
Los Olmos (La Plata)	7,56	0,85	2,4	2,0	3,2	0,3	6,6	0,8	1,0	2,2	2,2

Fuente: Balcaza L., 2006. CSR: carbonato de sodio residual

Los datos de la Tabla 20 muestran que el sodio y el bicarbonato son los iones predominantes, lo que se traduce en un pH superior a 7. Este aspecto será tratado en detalle en un capítulo aparte.

Los distintos cultivos poseen diferente resistencia a la salinidad. A título de ejemplo se ilustra en la Tabla 21 niveles de tolerancia de conductividad eléctrica de algunas especies hortícolas.

Tabla 21. Tolerancia de cultivos hortícolas a la salinidad expresada como conductividad eléctrica (CE) y reducción del rendimiento por encima del umbral

Cultivos	Umbral de tolerancia CE (dS/m)	Pérdida de rendimiento %/unidad de CE (dS/m)
1.- Sensible		
Poroto	1,0	19
Zanahoria	1,0	14
Cebolla	1,2	16
Frutilla	1,0	33
2.-Moderadamente sensibles		
Pimiento	1,5	14
Repollo	1,8	9,7
Apio	1,8	6,2
Espinaca	2,0	7,6
Pepino	2,5	13
Tomate	2,5	9,9
Brócoli	2,8	9,2
3.-Moderadamente tolerantes		
Remolacha	4,0	9,0
Zapallito Zuchini	4,7	9,4

Fuente: Maroto J., 1990

En la Tabla 22 se detalla la tolerancia de especies ornamentales.

Tabla 22. Tolerancia a la salinidad de especies ornamentales

Especies tolerantes (2,1 – 2,8 dS/m): Picus, Pelargonium, Saintpaulina, Clavel, Crisantemo

Especies moderadamente tolerantes (1,4 – 2,1 dS/m): Cyclamen, Rosal, tapetes, Calceolaria, Zinnia
Especies sensibles (menos de 1,4 dS/m):Gladiolo, Tulipán, Azalea, Anthurium, Orquídeas, Camelia, Gardenia.
Fuente: Maroto J., 1990.

Tanto la acidificación como la alcalinización pueden conducir a valores de pH no óptimos para el normal desarrollo de los cultivos. En la Tabla 23 se ilustra acerca del pH considerado óptimo para algunas especies hortícolas.

Tabla 23. Intervalos deseables de pH para diversas plantas hortícolas

Cultivo	Intervalo de pH deseable	Tolerancia a la acidez
Alcaucil	6,8 - 7,5	Baja
Apio	6,0 – 7,5	Baja
Berenjena	5,5 – 6,5	Moderada
Brócoli	6,0 – 7,2	Baja
Calabaza	5,5 – 7,5	Moderada
Chaucha	5,7 - 6,8	Moderada
Coliflor	6,0 – 7,2	Baja
Espárrago	6,0 – 8,0	Baja
Espinaca	6,0 – 7,5	Baja
Frutilla	5,0 – 6,5	Alta
Lechuga	6,0 – 7,5	Baja
Maíz dulce	6,0 – 7,0	Moderada
Pepino	5,5 – 7,5	Moderada
Pimiento	5,5 – 7,0	Moderada
Tomate	5,5 – 7,5	Moderada
Zanahoria	5,5 – 7,5	Moderada

Fuente: Maroto J., 1990.

Los intervalos óptimos para especies florícolas pueden verse en la Tabla 24.

Tabla 24. Rango óptimo de pH para el desarrollo de especies florícolas (Adaptado de Balcaza L., 1996)

Cultivo	pH
Clavel	6,5 – 7,4
Rosa	6,4 – 7,0
Crisantemos	6,3 – 7,2
Lisiathus	5,6 – 6,5
Gypsophila	6,2 – 6,8
Gerbera	5,5 – 6,7
Fresia	6,5 – 6,7

Como se ha visto en párrafos precedentes, unos de los perjuicios del alejamiento del pH de la condición ideal, es la disminución de la disponibilidad de ciertos nutrientes. En la Tabla 25 se ilustra la condición de pH ideal para algunos nutrientes.

Tabla 25. Intervalos óptimos de pH para la absorción de los distintos nutrientes

Nutriente	**Intervalo de pH óptimo**
Nitrógeno	6,0 – 8,0
Fósforo	6,5 – 7,0
Potasio, Azufre	6,0 – 8,5
Calcio, Magnesio	7,0 – 8,5
Hierro	4,0 – 6,5
Manganeso	5,0 – 6,5
Boro, Cobre, Zinc	5,0 – 7,0
Molibdeno	7,0 – 8,5

Fuente: Maroto J., 1990.

En la Tabla 26 se muestra como la eficiencia de los fertilizantes conteniendo nitrógeno, fósforo y potasio, cambia de acuerdo al pH del medio. Las razones son múltiples, de orden fisiológico de las plantas y de orden edáfico, por procesos de transformaciones a formas poco disponibles como en el caso de fósforo, afectación de procesos microbiológicos como en el caso de nitrógeno, entre otros. Estas cifras son sólo orientativas, pues pueden cambiar con el tipo de fertilizante y fundamentalmente, con el tipo de suelo.

Tabla 26. Eficiencia relativa orientativa de la fertilización N P K según pH del suelo (Adaptado de Balcaza L, 1995)

Nutriente		**pH**	
	4 - 5	5 - 6	6 - 7
Nitrógeno	40-50	60-70	80-100
Fósforo	20-30	40-60	70-100
Potasio	40-50	60-100	100

FERTILIZANTES

Ing. Agr. Mirta García

Definiciones

Fertilizante: toda sustancia o mezcla de sustancias que incorporadas al suelo o aplicada sobre la parte aérea de las plantas, suministre él o los elementos que requieren los vegetales para su nutrición, con el propósito de estimular su crecimiento, aumentar su productividad y mejorar la calidad de los productos cosechados.
Abono: material orgánico que aporta elementos fertilizantes.
Enmienda: material que añadido al suelo corrige su pH y modifica favorablemente sus características físicas o físico-químicas por ej: cal viva o apagada, calcita, dolomita, etc.

Clasificación

- **Por su origen**

1.- Minerales: generalmente son sales inorgánicas (excepto la urea), los más utilizados son los nitrogenados, fosfóricos, potásicos. Se los puede subdividir en
a) Sintéticos: fosfato diamónico (FDA), sulfato de Mg, nitrato de amonio
b) Naturales: roca fosfórica, nitro de Chile

2.- Orgánicos: provienen de residuos de origen animal (deyecciones) o vegetal (rastrojos). Además de su contenido en nutrientes tiene un efecto muy favorable sobre las propiedades físico-químicas del suelo. Son mejoradores de la estabilidad estructural.

Dentro de los Minerales también se los puede clasificar según su composición química en:

2.1 Simples: formado por una sola sustancia, aunque contenga uno o más elementos nutrientes en su molécula. Ej: nitrato de amonio, urea, superfosfato simple
2.2 Compuestos: resultan de la mezcla de uno o más fertilizantes simples. Ej. 8:24:16 quiere decir que por cada 100 kg de esta mezcla contiene 8 kg de N, 24 kg de P y 16 de P
2.3 Complejos: cuando los elementos fertilizantes se obtienen por reacción química, ej. Fosfato diamónico

- **Por su estado físico**

Sólidos: se puede presentar básicamente en tres formas
* pulverulentos
* cristalizados
* granulados

Líquidos:
* soluciones verdaderas
* suspensiones

Gaseosos: ej. Amoníaco anhidro

Tipos de fertilizantes

Repasando, los fertilizantes contienen N, P, K, por separado, o en productos formados por mezclas de estos elementos. Pueden ser minerales (inorgánicos) u orgánicos. En función de los nutrientes contenidos se les denomina: simples (con uno sólo de los elementos primarios) o compuestos (con 2 o los 3 elementos primarios). Se habla de fertilizantes complejos cuando contienen elementos mayoritarios junto a algunos minoritarios.

Fertilizantes nitrogenados

El N es absorbido por las raíces generalmente bajo las formas de NO_3- y NH_4+. Su asimilación se diferencia en el hecho de que el ión nitrato se encuentra disuelto en la solución del suelo, mientras que gran parte del ión amonio está adsorbido sobre las superficies de las arcillas.
El nitrógeno añadido como abono, puede estar como urea, NH_4+ y NO_3-. Así la urea es sometida a la amonificación (formación de NH_4+) y nitrificación previas para su utilización por los microorganismos y plantas.
El amonio puede ser oxidado a NO_3- y ser fijado por las partículas sólidas del suelo o utilizado sin cambio por los microorganismos y las plantas.
Los nitratos pueden ser absorbidos directamente por microorganismos y plantas o pueden perderse por volatilización y lavado.
La textura de los suelo es un factor importante en relación con la lixiviación. Cuanto más fina sea la textura más capacidad de retención presentarán.

Tabla 27. Características de algunos fertilizantes nitrogenados

Productos	**Composición**	**Presentación**	**Solubilidad (g/100g de agua)**
Amoníaco anhidro	N = 82%	Gas almacenado a presión	25°C = 456
Urea	N = 46 %	Perlado, granulado y cristales de color blanco	20°C = 108
UAN	N = 30-32%	Líquido	
Nitrato de amonio	N = 32-34%	Perlado, granulado, cristalino	20°C = 187
Nitrato de amonio calcáreo	N = 27%	Granulado	20°C = 187
Sulfato de amonio	N = 21% S = 24%	Cristales o gránulos incoloros a castaño oscuro	20 °C = 75,4
Sulfonitrato de amonio	N = 26%	Granulado	----------

Fertilizantes fosforados

El fósforo es un elemento poco móvil en el suelo por lo que el fertilizante fosfatado debería ser colocado a la siembra y lo más cerca de las semillas. La disponibilidad de P para las plantas está determinada por los siguientes factores: pH del suelo, presencia de minerales que contiene Fe, Al y Mn o bien estos elementos en estado soluble, minerales de Ca y Mg disponibles, cantidad y disposición de materia orgánica y de la actividad de los microorganismos.
Todos estos factores están influenciados por el pH de suelo. La máxima disponibilidad del P ocurre para pH entre 6 y 7. A pH bajos, suelos ácidos, existe en solución Fe, Al y Mn que

reaccionan con el ácido fosfórico dando fosfatos hidróxidos insolubles. También existe la fijación por los óxidos hidróxidos formando fosfatos hidróxidos insolubles. La fijación por silicatos-arcillas, se realiza en condiciones de moderada acidez. En suelos alcalinos, los fosfatos precipitan con el Ca de cambio y con el de $CaCO_3$. Tan solo existe un rango de pH (alrededor de 6,5) en el que el fosfato se mantiene soluble, que es la situación en la que se puede presentar cierto riesgo de lixiviación.

La importante interacción de los fosfatos aportados por el fertilizante con la fase sólida del suelo, hace que el aprovechamiento instantáneo del P aplicado sea realmente escaso. La eficiencia de fertilización varía según el tipo de suelo (fundamentalmente pH y tipo de arcillas); fuente de fertilizante, y técnica de aplicación, pero en términos generales es muy reducida: alrededor de 10-20%. Sin embargo, el P remanente no se va del suelo, sino que queda en el mismo generando efectos residuales en cultivos posteriores. Estas es una característica muy importante de este elemento ya que es posible desarrollar esquemas de fertilización fosfatada variando la dosis de fertilizante en función de la relación insumo/producto.

Tabla 28. Características de algunos fertilizantes fosforados

Productos	**Composición**	**Presentación**	**Solubilidad (g/100g de agua)**
Fosfato Diamónico	P = 20% N = 18 %	Granulado y cristalino	20°C = 69,6
Fosfato Monoamónico	N = 11% P = 23%	Gránulos de color blanco a negro según origen y proceso industrial	20°C = 38,4
Roca fosfórica	P = 12%	En polvo y granulada	Soluble en citrato
Superfosfato Triple	P = 20%	Gránulos de color grisáceo	Soluble 85-100%
Superfosfato Simple	P = 9% S = 12%	Gránulos de color grisáceo	Soluble 85-100%

Fertilizantes potásicos

El potasio (K) es un nutriente esencial para la planta junto con el N y el P. A pesar que los suelos son muy ricos en K sólo están disponibles una pequeña cantidad durante el ciclo de crecimiento de las plantas.

A medida que el cultivo remueve K de la solución, el K intercambiable se libera y lo repone. El K puede reemplazarse por otros cationes en los coloides del suelo, y por medio del intercambio catiónico, está continuamente disponible para el crecimiento de las plantas. El fertilizante potásico tiende a mantenerse cerca del sitio donde se lo coloca (excepción suelos arenosos u orgánicos), por ello es vital mantener el nivel adecuado de K en el suelo.

Tabla 29. Características de algunos fertilizantes fosforados

Productos	**Composición**	**Presentación**	**Solubilidad (g/100g de agua)**
Cloruro de K	K = 50%	Cristales irregulares	20°C = 34,5
Nitrato de K	N = 13% K = 36%	Perlado o cristalino	20°C = 31,6
Sulfato de K	K = 42% S = 18%	Cristales o gránulos	20 °C = 12
Sulfato de K y Mg	K = 18% S = 22% Mg = 11%	Cristales y gránulos	20 °C = 23

Mezclas físicas de fertilizantes: contienen dos o más tipos diferentes de fertilizantes no reactivos químicamente entre sí, o que reaccionan en forma mínima (Tabla 30)

Tabla 30. Mezclas físicas de fertilizantes

FDA[1]/FMA
Urea + FDA/FMA
FDA + Nitrato de Amonio
FDA/FMA + Urea+Sulfato de Amonio
Urea + Sulfato Amonio
FDA + Sulfato Amonio
FMAzufrado
FDA/FMA + Urea + Sulfato de Ca
FDA + Sulfato de Ca
UAN + FDA

[1] *Referencias*
FDA: fosfato diamónico
FMA: fosfato monoamónico
UNA: urea nitrato de amonio

Mezclas químicas de nutrientes: son los fertilizantes preparados especialmente con la concentración y la composición de nutrientes que requiere el productor. Ejemplos:

Tabla 31. Mezclas químicas de fertilizantes

20-20-14(S)
N + S (31-1,3)
N + P + S (7-40-7)
N + Ca + P + S (20-20-20-12)

Fertilizantes con micronutrientes

Son aquellos fertilizantes que contienen elementos químicos que son requeridos en pequeñas cantidades por las plantas o animales pero que su disponibilidad es completamente necesaria para que los organismos completen su ciclo vital.

Las fases solubles de los oligoelementos se pueden encontrar en forma iónica o bien quelatada, siendo fácilmente absorbibles por las plantas. Los micronutrientes u oligoelementos de la solución del suelo, en parte se pueden inmovilizar por complejación con

sustancias húmicas insolubles o a través de la fijación sobre las superficies de los minerales de la arcilla o de los óxidos. Por otra parte los residuos de las plantas, por descomposición, liberan estos micronuetrientes y moléculas orgánicas quelatantes, moléculas que pueden mantenerlos en solución, así como favorecer la solubilización de las formas insolubles. Por último una fracción es exportada del ciclo mediante las cosechas.

Una característica común a todos los fertilizantes que contienen micronutrientes es el hecho de que a partir de una vez que se supera el rango óptimo de concentración necesaria, toda cantidad adicional se vuelve tóxica para las plantas incluso llegando a un rango en el que la concentración es letal.

Tabla 32. Características de algunos fertilizantes con micronutrientes

Productos	**Composición**	**Presentación**	**Solubilidad (g/100g de agua)**
Acido Bórico	B = 17%	Cristales	20°C = 5,04
Borato de Na	B = 10-21%	Cristales y granulado (10%) Líquido y polvo crist (21%)	20°C = 9
Oxisulfato de Cu	Cu = 20%	Apto aplicación directa suelo	----------
Sulfato de Cu	Cu = 18%	Cristales o polvo.	20°C = 20,8
Quelatos de Fe	Fe = 8,5%	Líquido	100% soluble
Sulfato de Fe	Fe = 20% S = 12%	Cristales de color verde claro	20 °C = 26,6
Oxisulfato de Mn	Mn = 30-40%	Granulado marrón oscuro	----------

TÉCNICAS DE FERTILIZACIÓN

Dra. Mabel Vázquez

Peculiaridades nutricionales de los cultivos hortícolas

Cabe destacar que los cultivos hortícolas tienen algunas peculiaridades, respecto de otros cultivos extensivos. Entre ellas pueden citarse:

- Alto nivel de extracción de nutrientes: dado que en general en especies hortícolas se hacen varios cultivos/año en el mismo lote, así como, que cada uno de ellos es de alto rendimiento, la extracción de nutrientes es alta en comparación con otras culturas extensivas.

- Ritmo de la absorción: los nutrientes en el suelo se reservan en lo que se denominó factor "capacidad", a partir de donde se va reponiendo la solución del suelo o factor "intensidad", que es de donde se nutre la planta. Puede ocurrir que el factor capacidad sea bueno, pero en condiciones de cosecha de cultivos de alto rinde/unidad de tiempo, la reposición no logre satisfacer el ritmo de la demanda del cultivo. Este caso es frecuente en producción bajo cubierta de cultivos hortícolas.

- Mayor probabilidad de generar desequilibrios en el suelo: dado que los suelos dedicados a esta actividad reciben elevadas y frecuentes dosis de fertilizantes, si la fertilización no se hace sobre bases estrictamente técnicas, con facilidad puede generarse desequilibrio de nutrientes en el suelo, particularmente con elementos menos móviles como fósforo, zinc, y en menor medida potasio.

- Pérdida de nutrientes móviles por riego: como la mayor parte de estos cultivos se hacen bajo riego, la lixiviación de nutrientes móviles es más probable. Esto trae consecuencias negativas en el sentido de la baja eficiencia del gasto generado por el fertilizante, pero además, puede redundar en contaminación de los acuíferos. El caso más frecuente es el del nitrógeno.

La reposición de nutrientes puede realizarse a través de abonos orgánicos naturales y de fertilizantes de síntesis, mayoritariamente inorgánicos. Los primeros serán tratados en un capítulo aparte. Nos referiremos, en este punto, a los fertilizantes de síntesis.

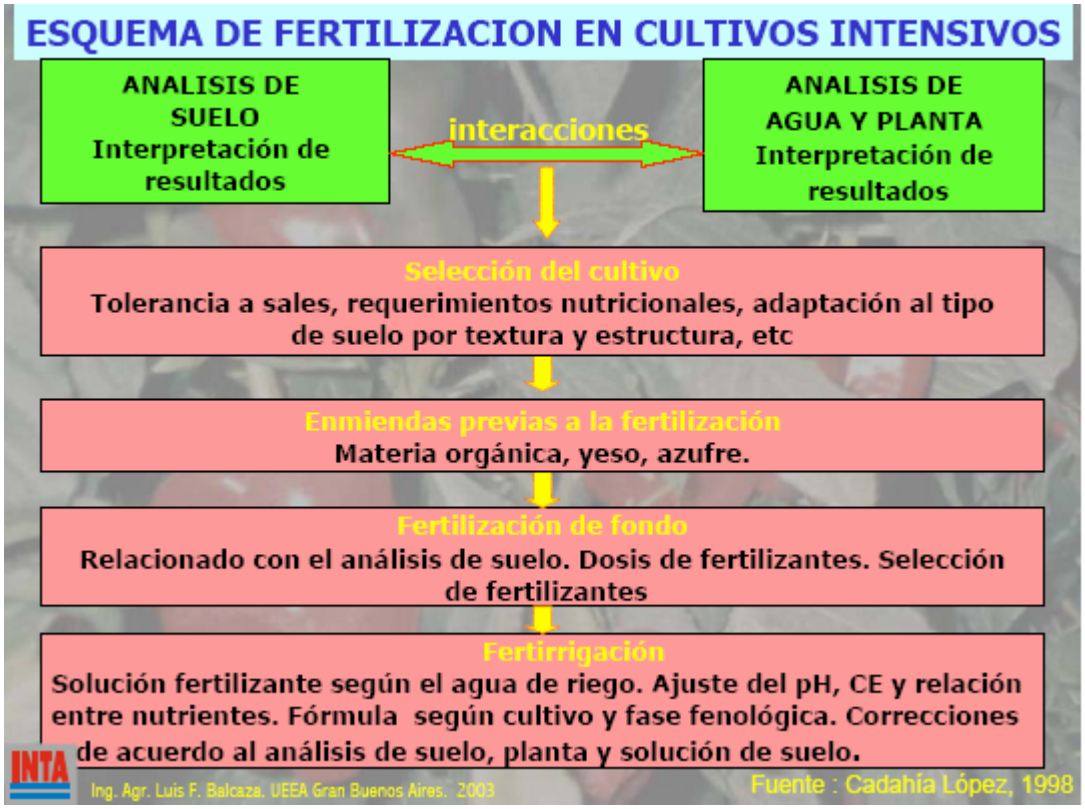
Los fertilizantes pueden aportarse de la siguiente forma:

Fertilizaciones de fondo: son las que se realizan durante las labores de preparación de las camas de siembra o transplante. Están dirigidas a generar una fertilidad inicial óptima. Permiten, además, aportar aquellos elementos de baja solubilidad y movimiento en el suelo, tal el caso del fósforo, ya que incorporándolos al suelo mediante labores culturales, se homogeniza la fertilidad en el ambiente rizosférico. En general, en esta fertilización se aplica el 50% del fósforo establecido como dosis y el 25-30% del fertilizante potásico, mezclándolo con el suelo en oportunidad de preparación de la cama de siembra o transplante. La razón de ello es la baja movilidad de fósforo y moderada de potasio. Tanto mayor es la importancia de estas fertilizaciones cuanto mayor es la desprovisión de estos elementos en el suelo. De tratarse de suelos con adecuados niveles, puede omitirse y sólo suplir con fertilizaciones a lo largo del ciclo, los períodos de mayor demanda. Si se trata de

suelos con antecedentes hortícolas o florícolas, con frecuencia de agregados de enmiendas orgánicas, pude ser innecesario aplicar nitrógeno en esta oportunidad, especialmente si se laborea el suelo, pues el laboreo mineraliza materia orgánica y pone nitrógeno en disponibilidad de las plantas. De no ser así, y con resultados de análisis de suelo que lo sugieran, se aplica alrededor del 20 % de la dosis establecida.

Fertilización de cobertura*:* se realiza con el cultivo ya implantado, en forma sólida sobre el suelo, o en forma líquida por aspersiones foliares. Están dirigidas a corregir deficiencias emergentes, aportar elementos en ciertos estadios fenológicos de alto requerimiento, en particular para aquellos nutrientes de baja residualidad.

Fertirrigación: se utiliza en aquellos cultivos con riego localizado, pues en estas condiciones el mojado del suelo es un bulbo debajo de la planta, permaneciendo seco el resto del suelo, particularmente en cultivos en invernáculo. Esto hace que la dinámica de los nutrientes sea muy baja fuera del bulbo, a la par que las raíces también se concentran en él. En estas condiciones la fertirrigación es más una necesidad que una elección. Este sistema de fertilización permite un suministro paulatino de los nutrientes y variaciones de dosis de acuerdo al requerimiento del estadio fenológico del cultivo. Cuando es manejado con criterio, permite reducir las pérdidas por lixiviación de los elementos solubles como el nitrógeno, eficientizando el uso del insumo, debido a su aporte localizado en la zona de mayor actividad radical de las plantas. Los resultados son superiores a las fertilizaciones sólidas vía suelo. El esquema a seguir puede verse a continuación:



Toda fertilización debe basarse en los resultados de los análisis químicos del suelo y/o vegetal, así como en los requerimientos específicos del cultivo. Esto permitirá hacer un uso eficiente de los insumos, evitará generar desequilibrios por sobrefertilizaciones, especialmente en nutrientes poco móviles y protegerá al suelo y las napas de la contaminación con elementos que en ciertos niveles, pueden resultar tóxicos para los animales, otras plantas y hasta el mismo hombre.

FERTIRRIEGO

Dra. Mabel Vázquez

Distribución de la humedad y las raíces: el riego convencional provoca un mojado en forma de frente en todo el perfil de suelo. En contraste, bajo el riego por goteo, el agua se aplica en puntos discretos de la superficie y se produce una infiltración tridimensional del agua, definiendo un bulbo húmedo, espaciado de otros bulbos, si los goteros están separados. Si los emisores están mas cerca entre sí, los bulbos húmedos se fusionan, al punto de mostrar un patrón de descarga bidimensional cuando están muy juntos entre si.

Estos patrones de mojado variarán también con las características del suelo, particularmente su textura o granometría. De ahí que la distribución de os nutrientes aportados a través del riego dependerá de las propiedades de conductividad hidráulica del suelo, del caudal de descarga del emisor, y del tiempo de aplicación. Los resultados muestran que al aumentar el caudal puede aumentar el área mojada horizontalmente y disminuir la profundidad de mojado. Al aumentar la cantidad de agua aplicada aumenta el desplazamiento de agua en ambas direcciones. Cuanto menor es la conductividad hidráulica saturada del suelo (franco vs. arenoso) mayor es el volumen horizontal y menor el volumen vertical de suelo mojado. En suelos arenosos la distribución de agua horizontal es generalmente bastante limitada, cualquiera sea el caudal de descarga, frecuencia o volumen de agua aplicada (INTA Pergamino, 2007).

El sistema radical se adapta rápidamente en su estructura al bulbo húmedo, proliferando las raíces en él. En condiciones áridas, el área no regada del suelo carece de raíces. En zonas húmedas o subhúmedas a campo abierto, durante la temporada de lluvias se emiten nuevas raíces fuera del bulbo húmedo, pero la mayor parte funciona en la parte regada.

Las limitaciones en el desarrollo de raíces a un volumen específico de suelo impuesto por el riego por goteo, tiene importancia particular para las técnicas del manejo de cultivo, incluyendo aplicaciones de fertilizantes. Por ejemplo, la planta puede ser muy sensible a las fluctuaciones de agua del suelo o niveles de nutrientes, en el volumen de suelo mojado, mientras que no la afecta en absoluto la fertilidad del suelo circundante. También alrededor del bulbo húmedo pueden desarrollarse condiciones anaeróbicas que ocasionan pérdida de nitrógeno en forma volátil. Estas condiciones temporarias de reducción, pueden aumentar el contenido de P asimilable. Un exceso de ácido puede desplazar el calcio y el magnesio hacia los límites del bulbo, causando una disminución de la disponibilidad de estos nutrientes. Y así muchos otros ejemplos derivados de este efecto (INTA Pergamino, 2007)

Movilidad de los nutrientes en el suelo: la movilidad de los iones en el suelo es importante porque condicionan el manejo de la nutrición de un cultivo. La distribución será muy diferente cuando un nutriente no es capaz de ser retenido por atracción eléctrica en las arcillas o la materia orgánica como el nitrógeno, o a través de la formación de compuestos insolubles, como los fosfatos. De ahí que desarrollemos brevemente este punto (Adaptado de El Ambiente Edáfico, INTA Castelar, 2007).

Nitrógeno. La distribución inicial del N agregado al suelo desde un emisor varía ampliamente según la fuente de N aplicado. Cuando el N se aplica como amonio, éste se unirá eléctricamente (adsorción) a la materia orgánica o a las arcillas del suelo y se moverá una corta distancia desde el emisor. A medida que se saturan los sitios de intercambio, los iones amonio se moverán más lejos. Si bien la transformación de amonio a otra forma de

nitrógeno asimilable, los nitratos, es relativamente rápida en suelos agrícolas, no lo es comúnmente en el bulbo húmedo casi ausente de oxígeno, ya que esta transformación es una oxidación y requiere aireación. La nitrificación se desarrolla en la zona insaturada. Así la acumulación de amonio bajo el emisor puede ser un problema para algunas especies sensibles, o bajo condiciones que no favorecen la fotosíntesis. En esas circunstancias, el amonio se acumula en la planta sin reducirse a nitrato, resultando tóxico y dificultando la absorción de otros cationes.

La urea, un fertilizante nitrogenado sumamente difundido, es relativamente móvil en el suelo, no es polar y su distribución se asemeja a la del nitrato. En el suelo la urea se hidrolizará a amonio en un periodo de unas pocas horas y luego se nitrificará, es decir se transformará en nitratos. El desplazamiento mas profundo de la urea en relación al amonio, tiende a minimizar las pérdidas de N por volatilización de amonio pero aumentará las debidas a lixiviación de nitratos.

El nitrato es altamente móvil, se mueve junto con el frente de mojado desde el emisor y tiende a acumularse en la periferia del bulbo húmedo y en la superficie del suelo entre los emisores. La absorción tendrá lugar preferentemente en el borde o frente de mojado. Es importante destacar que el nitrato es susceptible de perderse por lixiviado fuera del bulbo y por transformaciones a formas volátiles (desnitrificación). La importancia de la primera dependerá del manejo de la frecuencia del riego. Algunos experiencias demuestran que puede lograrse una mayor extensión lateral y menor hacia abajo, al aumentar el caudal de descarga del emisor, aun en suelos arenosos. Esto sugiere que un mayor caudal puede mejorar la distribución de nutrientes solubles, principalmente para cultivos de escasa proliferación vertical de raíces.

Muchas pautas de manejo de la nutrición nitrogenada comprenden balance de las tres formas de N aplicado al cultivo. Una relación generalizada que da óptimos resultados es de 2:1:1 de urea:nitrato:amonio.

Fósforo. La proporción de su desplazamiento en el suelo desde el emisor dependerá de la capacidad de fijación de fosfatos del suelo. La fijación será tanto mayor cuanto más ácido o básico sea el suelo, ya que su movilidad es máxima cerca de pH 6,5. El fósforo aplicado está confinado al volumen de suelo directamente rodeando al emisor. En general la distancia es proporcional a la dosis de aplicación ya que el movimiento resulta de la saturación cerca del punto de aplicación y la translocación posterior con el flujo de agua. En general, si se deseara una distribución relativamente uniforme de la concentración de fosfato en el volumen de suelo, se requiere una aplicación de fondo incorporada al suelo, previa a la instalación del cultivo.

Potasio y micronutrientes. A igual que el amonio, el potasio, se une eléctricamente en los coloides del suelo (arcilla, materia orgánica) y su movimiento depende de la capacidad de intercambio del suelo y la dosis de aplicación. Los micronutrientes con carga positiva (cationes) tienden a ser relativamente inmóviles en el , aun cuando son agregados como quelatos, ya que una vez en el suelo, el micronutriente es separado del quelato por otros iones. Ejemplo de esto son el hierro, cobre, zinc y manganeso.

Existen evidencias que demuestran que las plantas se adaptan perfectamente a condiciones de variabilidad espacial y de concentración de nutrientes por dos mecanismos, aumentando la tasa de absorción por unidad de raíz en la zona enriquecida, y por una mayor proliferación radical en la zona del bulbo húmedo. Así, al menos en parte, las plantas ajustan su distribución radical y patrón de absorción de nutrientes para compensar una distribución desuniforme de nutrientes dentro de la zona potencialmente explorable por raíces. El efecto de esta distribución desuniforme bajo riego por goteo no es demasiado grande y en particular cuando se aplican dosis suficientemente altas de nutrientes.

El suministro de los nutrientes: los híbridos y nuevos cultivares necesitan de una adecuada provisión de nutrientes para expresar su potencial de rendimiento. La concentración de nutrientes en la zona radical es el factor decisivo y está determinado en principio por la concentración de éstos en el agua de riego. La relación entre ambas concentraciones no es directa ni simple, y los factores que pueden influir son varios; entre éstos pueden mencionarse principalmente la tasa de absorción de nutrientes por las plantas, la tasa de evapotranspiración y las reacciones de fijación o adsorción en la fase sólida del suelo.

Cada combinación agronómica que implique una variedad, un suelo, un clima y un sistema de manejo, define un único patrón de absorción y consumo de nutrientes por unidad de tiempo que varia a través del ciclo de crecimiento y desarrollo. También define un óptimo consumo diario de agua que no limita la fotosíntesis y evita la perdida de agua por lixiviación. Lo mas adecuado sería determinar para cada una de dichas combinaciones agronómicas, los mencionados patrones o curvas de absorción de nutrientes y producción de materia seca. Sin embargo, el procedimiento es lento y consume muchas horas de trabajo, ya que se debería evaluar periódicamente con una metodología estándar. Las cantidades integradas a lo largo del tiempo definen lo que se denomina usualmente función cantidad (Qt) y determinan la dosis mínima de aplicación diaria de un nutriente, sea en el agua de riego o incorporado al suelo, requerido para mantener una concentración del nutriente en el suelo. La dosis real a aplicar debe aumentarse porque la eficiencia de aplicación disminuye por la adsorción de nutrientes en los coloides de suelo, lixiviación u otros factores de pérdida. Bajo un buen manejo, la eficiencia de la fertirrigación puede considerase entre un 70 a 80 %. En aplicación convencional sobre el suelo, incorporándola luego, la eficiencia puede ser de 40 a 50 %. Estas cifras pueden variar considerablemente entre nutrientes.

Las tasas de absorción diarias de N, P y K para cada cultivo, deben determinarse en experimentos controlados en condiciones similares de potencial de rendimiento, de patrón de producción y arquitectura de plantas. Estos datos pueden usarse para cálculos como el siguiente: Si entre los 40 y 60 días desde el trasplante, el tomate absorbe cerca de 2,5 kg/ha/día de nitrógeno, y nuestro turno de riego es de 7 días, con una lámina de 3 mm; deberemos suministrar por lo menos 17,5 kg/ha de N (2.5 x 7 días); este N diluido en 30 m^3, a una concentración de 580 g/m^3 (ppm), (17500 g/30 m^3).

Estrategias de aplicación: el concepto de inyección de fertilizantes puede dividirse en 2 grupos (Figura 14).

- **Cuantitativo,** ó no proporcional, concepto que se caracteriza por la dilución constante de la solución fertilizante mientras se la inyecta en el sistema de riego, es decir de *concentración decreciente.*
- **Proporcional,** concepto caracterizado por una *concentración constante* de la solución fertilizante en el agua de riego a través de todo el turno de riego.

El concepto cuantitativo puede ser usado en suelos de textura media a pesada, que tienen una capacidad significativa de almacenar el agua y los nutrientes aplicados. Por esa razón las dosis de aplicación son expresadas en términos de kg/ha/día (o por semana) o g/m^2/día (o por semana). El concepto es más popular en plantaciones de frutales o cultivos de campo.

El concepto proporcional se usa generalmente en suelos más arenosos, con mucha menor capacidad para almacenar o retener los nutrientes en sus partículas. En estos casos, las plantas sólo utilizan los nutrientes disueltos en el agua de riego. Por lo tanto la aplicación se expresa en términos de concentración (g/m^3 ; partes por millón (ppm)). Es el sistema mas popular en invernáculos, o cultivos sin suelo.

Las cantidades totales aplicadas en ambos casos deberían ser iguales, ya que los requerimientos de las plantas son independientes del método de aplicación. Una vez

determinada las cantidades totales a aplicar por nutriente, los cálculos deben definir, en función de:

1**)** La concentración del nutriente en la solución fertilizante concentrada

2**)** la cantidad a aplicar de fertilizantes con el agua de riego. Una vez definido esto, regular el sistema para un tiempo de funcionamiento, o especificar los caudales de riego o de flujo de la solución concentrada.

La frecuencia de aplicación de fertilizantes admite variaciones. Por ejemplo, una fertirrigación por cada turno de riego, o una vez fertirrigación y otra vez sólo irrigación, o cada dos veces, o mas espaciada aún. A medida que el turno de fertilización se hace mas espaciado, se hace necesario aplicar soluciones mas concentradas con el agua de riego para satisfacer las cantidades de nutrientes necesarias. Esto induce riesgos de saturación de las soluciones, al superarse el producto de solubilidad de las especies iónicas, produciendo precipitados que obstruyen los emisores.

Una alternativa comúnmente usada es aplicar distintas fuentes en distintos turnos; por ejemplo, un turno se aplica *nitrato de potasio,* y en otro turno, *nitrato de calcio y de magnesio, o de amonio.* Con esta modalidad es frecuente realizar aplicaciones de *ácido fosfórico* como flujos finales de lavado del sistema, al final de las aplicaciones de los otros fertilizantes, ya que por su carácter ácido disuelve los posibles precipitados en los emisores. Este lavado de flujo para disolución de los depósitos salinos, también puede realizarse con ácido clorhídrico al 0,6 %, por 10 a 15 minutos, seguidos por una hora de riego con agua solamente.

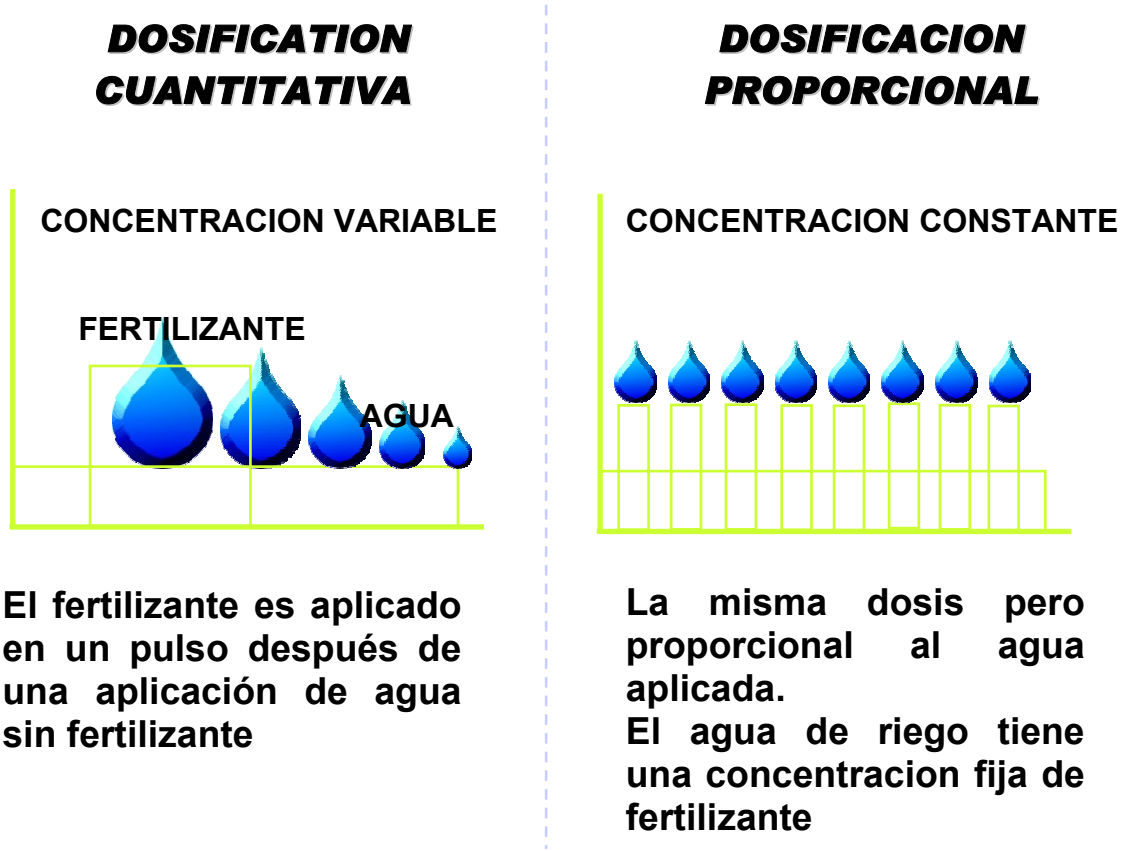


Figura 14. Esquema de las estrategias de aplicación de fertilizantes en las soluciones de fertirriego

Información necesaria para un programa de fertirrigación

Para planificar una estrategia de fertirrigación es necesario saber:

1.- De la Planta

- Variedad o híbrido a cultivar
- Época del año más favorable para su cultivo
- Necesidades nutricionales e hídricas
- Variación de las necesidades nutricionales según etapas fenológicas (implantación, crecimiento, floración, fructificación y cosecha)

2.- Del agua

- pH
- Conductividad eléctrica
- Cationes (calcio, magnesio, potasio, sodio)
- Aniones (cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, nitratos)
- Relación de adsorción de sodio (RAS) y carbonato de sodio residual (CSR)

3.- Del suelo

- pH
- Conductividad eléctrica, composición catiónica y aniónica del estracto de saturación
- Materia orgánica
- Nitrógeno total
- P extractable
- Capacidad de intercambio catiónica y cationes intercambiables
- Microelementos
- Textura
- Retención hídrica (0,3, 1 y 1,5 MPa)

Fertilizantes para fertirriego, sus características y preparación de las soluciones

Existen 3 formas de preparar los fertilizantes para la fertirrigación:

1.- Preparación de soluciones madre o stock:

- Los agricultores preparan sus soluciones madre " a medida"
- Fertilizantes sólidos solubles (sulfato de amonio, urea, cloruro de potasio, nitrato de potasio), y acido fosfórico líquido pueden ser mezclados
- La solución madre es inyectada al sistema de riego a una tasa de 2-10 L/m^3

2.- Mezclas de fertilizantes sólidos (compuestos):

- Manufacturados para su uso en fertirriego
- Con diferentes relaciones NPK (20-20-20; 14-7-28; 23-7-23, etc.)
- Algunos contienen microelementos en la forma de quelatos

3.- Soluciones de fertilizantes liquidos:

- Especificados para su uso en invernáculos
- la concentración total de nutrientes es más baja debido a la solubilidad (5-3-8; 6-6-6; 9-2-8, etc.).
- Algunos contienen microelementos en la forma de quelatos

Las condiciones necesarias para que un fertilizante pueda ser usado en fertirrigación son las siguientes:

- Alto contenido de nutrientes en solución
- Solubilidad completa en condiciones de campo
- Rápida disolución en el agua de riego

- Grado fino, fluyente
- No obturar goteros
- Bajo contenido de insolubles
- Mínimo contenido de agentes condicionantes
- Compatible con otros fertilizantes
- Mínima interacción con el agua de riego
- Sin variaciones bruscas del pH del agua de riego (3.5<pH<9)
- Baja corrosividad del cabezal y del sistema de riego

En las Tablas 33, 34 y 35 se listan algunos fertilizantes para su uso en fertirrigación.

Tabla 33. Fertilizantes nitrogenados utilizados en fertirriego

Fertilizante	**Grado $N - P_2O_5 - K_2O$**	**Fórmula**	**pH (1 g/L a 20°C)**
Urea	46 – 0 – 0	$CO(NH_2)_2$	5,8
Nitrato de Potasio	13 – 0 – 46	KNO_3	7,0
Sulfato de amonio	21 – 0 – 0	$(NH_4)_2SO_4$	5,5
Urea nitrato de amonio*	32 – 0 – 0	$CO(NH_2)_2 . NH_4NO_3$	
Nitrato de amonio*	34 – 0 – 0	NH_4NO_3	5,7
Mono fosfato de amonio*	12 – 61 – 0	$NH_4H_2PO_4$	4,9
Nitrato de Calcio*	15 – 0 – 0	$Ca(NO_3)_2$	5,8
Nitrato de Magnesio*	11 – 0 – 0	$Mg(NO_3)_2$	5,4

**Sólo calidad fertirriego*

Tabla 34. Fertilizantes fosforados utilizados en fertirriego

Fertilizante	**Grado $N - P_2O_5 - K_2O$**	**Fórmula**	**pH (1 g/L a 20°C)**
Acido fosfórico	0 – 52 – 0	H_3PO_4	2,6
Monofosfato de potasio	0 – 52 – 34	KH_2PO_4	5,5
Mono fosfato de amonio	12 – 61 – 0	$NH_4H_2PO_4$	4,9

Tabla 35. Fertilizantes potásicos utilizados en fertirriego

Fertilizante	**Grado $N - P_2O_5 - K_2O$**	**Fórmula**	**pH (1 g/L a 20°C)**	**Otros nutrientes**
Cloruro de potasio (solo blanco)	0 – 0 – 60	KCl	7.0	46 % Cl
Nitrato de potasio	13 – 0 – 46	KNO_3	7.0	13 % N
Sulfato de potasio (sólo calidad fertirriego)	0 – 0 – 50	K_2SO_4	3.7	18 % S
Tiosulfato de potasio (líquido)	0 – 0 – 25	$K_2S_2O_3$		17 % S
Monofosfato de potasio	0 – 52 – 34	KH_2PO_4	5.5	52 % P_2O_5

Los **micronutrientes** pueden proveerse por ejemplo como:

- Sales inorgánicas: Sulfatos de Fe-Zn-Mn-Cu:
    - se transforman rápidamente en no disponibles en el suelo:

$$Fe^{2+} + 3\ H_2O \Longleftrightarrow Fe(OH)_3\ (\text{precipitado}) + 3\ H^+ + 1\ e^-$$

    - pueden precipitar en el sistema de riego con el fósforo
    - disponibilidad reducida
    - obturación de goteros
- Quelatos: moléculas orgánicas protectoras y estables que envuelven al metal (Figura 15)
    - evita la precipitación
    - evita la hidrólisis

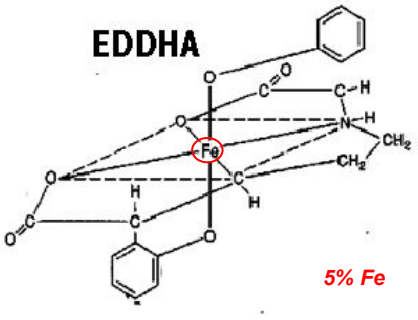


Figura 15. Estructura de un quelato conteniendo hierro. Fe - Ethylen Diamina Dihydroxyphenyl Ácido Acético

En la Tabla 36 se ilustra, a manera de guía, la concentración máxima admitida y otras características de soluciones multinutrientes.

Para preparar fertilizantes para fertirriego deben tenerse en cuenta algunos aspectos particulares:

- La solubilidad de una mezcla está limitada por el fertilizante menos soluble

- Precipitación de compuestos Ca-Mg/P:
    - Obturación de goteros y filtros
    - Menor disponibilidad de nutrientes
- Corrosividad
- Descomposición de quelatos a pH extremos
- Efecto enfriante al mezclar fertilizantes (reacciones endotérmicas), de acuerdo orden de mezclado

Tabla 36. Concentraciones máximas y características de las soluciones fertilizantes preparadas a 10 ºC

Relación $N-P_2O_5-K_2O$	**Composición (peso/volumen)**	**Materiales (En orden de adición)**	**Turbidez (NTU)**	**Gravedad especifica**	**pH (1: 1000)**	**Conductividad (1:1000 dS/m)**
K						
0-0-1	0-0-7.9	KCl	12,2	1,06	6,7	0,22
NK						
1-0-1	4,9-0-4,9	Urea/KCl	16,0	1,07	6,2	0,16
1-0-2	3,1-0-6,3	Urea/KCl	7,5	1,07	5,4	0,19
1-0-3	2,7-0-8,1	Urea/KCl	8,8	1,09	5,1	0,24
2-0-1	6,0-0-3,1	Urea/KCl	7,5	1,08	4,8	0,09
3-0-1	7,8-0-2,6	Urea/KCl	15,3	1,08	5,1	0,07
PK						
0-1-1	0-6,3-6,3	H_3PO_4/KCl	3,2	1,09	2,7	0,45
0-1-2	0-3,7-7,4	H_3PO_4/KCl	8,4	1,11	3,3	0,35
0-1 -3	0-3,2-9,6	H_3PO_4/KCl	7,1	1,12	3,4	0,36
0-2-1	0-7,4-3,7	H_3PO_4/KCl	3,0	1,09	2,7	0,41
NPK						
1-1-1	3.6-3.6-3,6	H_3PO_4/Urea/KCl	5,4	1,08	3,3	0,30
1-1-3	2,7-2,7-8,1	H_3PO_4/Urea/KCl	5,0	1,11	3,6	0,36
1-2-1	2.,7-5,4-2,7	H_3PO_4/Urea/KCl	4,0	1,08	3,1	0,38
1-2-4	2,5-5,1-10,1	H_3PO_4/Urea/KCl	4,3	1,14	4,3	0,49
3-1-1	7,4-2,5-2,5	H_3PO_4/Urea/Ferti-K	6,8	1,07	4,3	0,20
3-1-3	5,1-1,7-5,1	H_3PO_4/Urea/Ferti-K	8,3	1,08	3,7	0,22

Fuente: Lupin et al, 1999

Los distintos fertilizantes varían su solubilidad de acuerdo a la temperatura en que son preparados. En la Tabla 37, se consignan los valores de solubilidad de distintos fertilizantes.

Tabla 37. Variación de la solubilidad de varios fertilizantes al variar la temperatura

Fertilizante	**TEMPERATURA (ºC)**					
	0	5	10	20	25	30
	g/L					
Urea	680	780	850	1060	1200	1330
Sulfato de amonio	700	715	730	750	770	780
Sulfato de potasio	70	80	90	110	120	130
Cloruro de potasio	280	290	310	340	350	370
Nitrato de potasio	130	180	210	320	370	460

Fuente: INTA Pergamino 2007

Uno de los requisitos indispensables para lograr eficiencia en el sistema agua-suelo-planta es una baja salinidad, medida por la conductividad eléctrica (CE) de la solución fertilizante o solución de suelo. Lograrla es también una preocupación de los productores, quienes a través de cultivos sucesivos en el mismo sitio, incrementan los riesgos de acumulación de sales. En las regiones húmedas, cuando las coberturas plásticas son removidas temporariamente, el peligro de salinización disminuye por la acción de lavado de las aguas de lluvia.

A pesar del riesgo de una alta salinidad, ésta es mejor tolerada en períodos de alta intensidad lumínica. Los cultivos son más tolerantes a niveles altos de CE (3.5 a 4.0 dS/m) bajo estas condiciones que con intensidad lumínica baja (hasta 2.5 a 3.0 dS/m). Por otra parte, una mayor salinidad es favorable para el desarrollo de sabor durante el período de maduración de los frutos, especialmente cuando ésta es alcanzada levantando los niveles de K. Es peligroso sin embargo, regular el exceso de salinidad restringiendo los volúmenes de agua regados, ya que puede provocar entre otros problemas, una mayor incidencia de podredumbre apical.

Los fertilizantes son sales que contribuyen al aumento de la salinidad del agua de riego. La salinidad afecta principalmente la presión osmótica con que el agua es absorbida, requiriendo consecuentemente mayor energía de la planta. Cuando el agua de riego posee una conductividad eléctrica entre 0,25 y 0,75 dS/m, representa un moderado a alto peligro de salinización del suelo.

La operación de fertirrigar, al agregar fertilizantes, aumenta la concentración salina del agua de riego y también la de la solución del suelo. Experimentalmente se tiene que 10 meq/l de sales en la solución es, aproximadamente, 1 mS (ó 1 dS/m) de conductividad eléctrica de la solución. Un miliequivalente de sales solubles corresponden, aproximadamente, a 64 mg.de sal, dependiendo del tipo de ésta. En base a esta relación es posible controlar la fertilización por medio de la medición directa de la CE con un conductímetro, determinando directamente la concentración de la solución de riego. En los picos de máximo consumo de nutrientes en cultivos hortícolas de invernáculo, la concentración aportada por los nutrientes en el agua puede llegar a 15-20 meq/l, incrementando sensiblemente su salinidad en 1,5 a 2,0 mS adicionales al agua de irrigación. Bajo esas condiciones, especialmente cuando el agua excede 1,0 mS, se deben extremar los cuidados en los iones acompañantes, minimizando aquellos no absorbidos, por ejemplo Cl^- ó $SO_4^=$ (Tabla 38).

Tabla 38. Variación de la CE al variar la concentración de nutrientes

	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (mS/cm)			
	2.0	3.0	4.0	5.0
Nutrientes	mg/L			
Nitrógeno (NO_3)	180	310	435	560
Fósforo (P)	40	40	40	40
Potasio (K)	300	500	700	900
Calcio (Ca)	200	330	470	600
Magnesio (Mg)	40	65	95	120

Fuente: INTA Pergamino,2007

En la Figura 16 se ilustra el tenor salino de algunos fertilizantes

Indice salino (%)

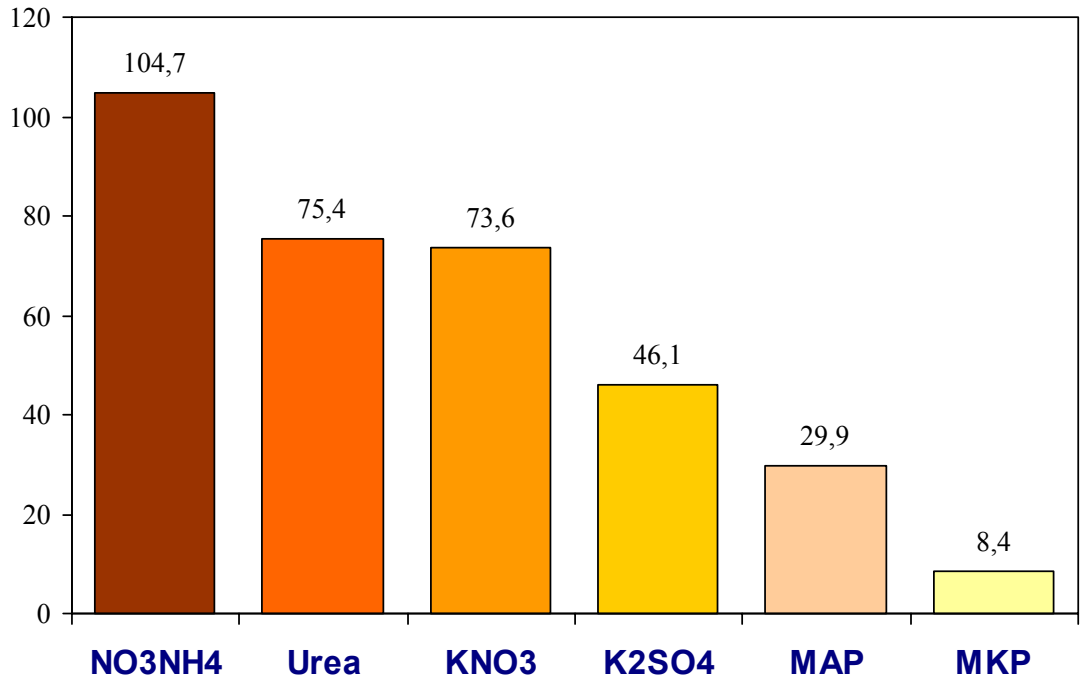


Figura 16. Tenor salino de distintos fertilizantes tomando como base 100 al $NaNO_3$

Es importante conocer la compatibilidad de los diferentes fertilizantes a la hora de preparar las soluciones madre. A manera de guía se ilustran en la Tabla 39, 3 niveles de compatibilidad entre fertilizantes.

Tabla 39. Compatibilidad entre fertilizantes solubles

	Urea	Nitrato de amonio	Sulfato de amonio	Nitrato de calcio	Nitrato de magnesio	Fosfato monoamónico	Fosfato monopotásico	Nitrato de potasio	Sulfato de potasio	Cloruro de potasio	Acido fosfórico	Acido nítrico	Acido Sulfurico	Sulfatos Fe,Zn,Cu,Mn	Quelatos Fe,Zn,Cu,Mn	Sulfato de magnesio
Urea																
Nitrato de amonio																
Sulfato de amonio																
Nitrato de calcio			■													
Nitrato de magnesio																
Fosfato monoamónico				■	■											
Fosfato monopotásico				■	■											
Nitrato de potasio			▒													
Sulfato de potasio			▒	■	■											
Cloruro de potasio									▒							
Acido fosfórico				■	■											
Acido nítrico																
Acido Sulfurico				■	■				▒							
Sulfatos Fe,Zn,Cu,Mn				■	■	■			▒							
Quelatos Fe,Zn,Cu,Mn				▒	▒	▒					▒	■				
Sulfato de magnesio				■	■	■			▒							

Compaible

Se reduce la solubilidad

Incompatible

Fuente: INTA Pergamino, 2007.

Los fosfatos de calcio y los fosfatos de magnesio precipitan con facilidad y bloquean el sistema, hecho que ocurre con cierta frecuencia cuando el agua de irrigación es alcalina y dura, conteniendo altos niveles de calcio y magnesio. Esto puede evitarse, bajando el pH del agua de irrigación. Si el pH del agua es mantenido constantemente bajo, la precipitación no tiene lugar y no ocurre ese bloqueo. Esta estrategia también puede ser una ventaja desde el punto de vista de la nutrición del cultivo, ya que el uso de fertilizantes ácidos sobre suelos alcalinos favorece la eficiencia de uso de los nutrientes, incrementando la disponibilidad de fósforo y otros elementos. El fosfato monoamónico es acidificado porque tiene un pH de 4,5 y la urea fosfato es altamente acidificada, tiene un pH de 2,7.

Preparación de la solución madre

1.- Se deben pesar las sales individualmente, evitando en lo posible perdidas de material, asegurando una variación de mas o menos 5 % en una escala en gramos.

2.- Llenar el tanque con agua en un 10 % de su totalidad.

3.- Disolver cada sal separadamente en recipientes grandes llenos de agua, y volcarlos en el tanque, repitiendo la operación hasta disolver totalmente la sal. Se puede utilizar agua caliente en caso de una difícil disolución.

4.- Disolver los micronutrientes primero y luego los macro.

5.- Cuando se trata de volúmenes pequeños se puede mezclar los sulfatos en forma seca antes de disolverse. Lo mismo con los nitratos y fosfatos.

6.- Dejar circular unos minutos la solución de nutrientes y medir el pH ajustándolo a 6 - 6,5, de ser necesario, con ácido sulfúrico o con hidróxido de potasio. Un pH alto puede causar la precipitación del Fe, Mn, PO_4^{3-}, Ca y Mg que se insolubilizan.

Cuando se utilicen aguas duras:

- Alto contenido de Ca y Mg (> 50 ppm)
- Alto contenido de bicarbonatos (> 150 ppm)
- pH alcalino (> 7.5)

considerar que:

1. El Ca y Mg del agua se combinan con el fosfato y/o sulfato del fertilizante y forman precipitados insolubles
2. El calcio forma carbonato de calcio insoluble:

$$CO_3^{2-} + Ca^{2+} \Longleftrightarrow CaCO_3 \text{ (precipitado) (a pH > 7.5)}$$

Por ello se recomienda:

- Elegir fertilizantes de reacción ácida (para P: ácido fosfórico, FMA)
- Inyección periódica de ácido en el sistema de riego para disolver precipitados y destapar los goteros
- Agregar fertilizantes de Ca y Mg sólo de acuerdo con su concentración en el agua de riego

Cuando se utilicen aguas salinas:

- Alta CE (> ~ 2-3 dS/m)
- Alta concentración de Cl (> 150-350 ppm)

El agregado de fertilizantes (sales inorgánicas) aumenta la CE de la solución nutritiva y puede causar daños a los cultivos.
Por ello se recomienda:

- Chequear la sensibilidad de los cultivos al la salinidad
- Elegir fertilizantes de bajo índice salino
- Regar por sobre la necesidad hídrica de la planta (fracción de lavado) para lavar las sales de la zona radical.

Estos conceptos serán ampliados en el capítulo Calidad de agua de riego

Pautas generales para la fertirrigación

En las Figuras 17 a 21 se ilustra la importancia relativa de los diferentes nutrientes en los estadios fenológicos generales:

Figura 17. Implantación del cultivo (Extraído de Balcaza L., 2007)

Figura 18. Etapa de crecimiento (Extraído de Balcaza L., 2007)

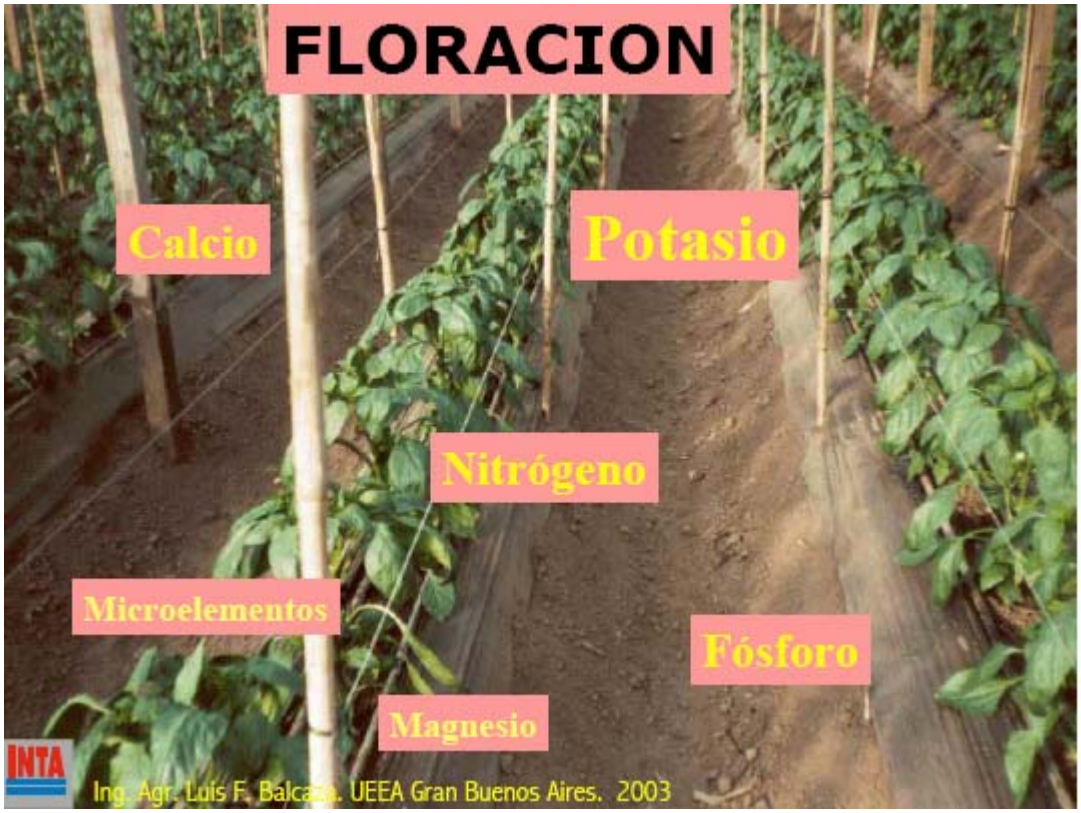


Figura 19. Floración del cultivo (Extraído de Balcaza L., 2007)

Figura 20. Fructificación del cultivo (Extraído de Balcaza L., 2007)

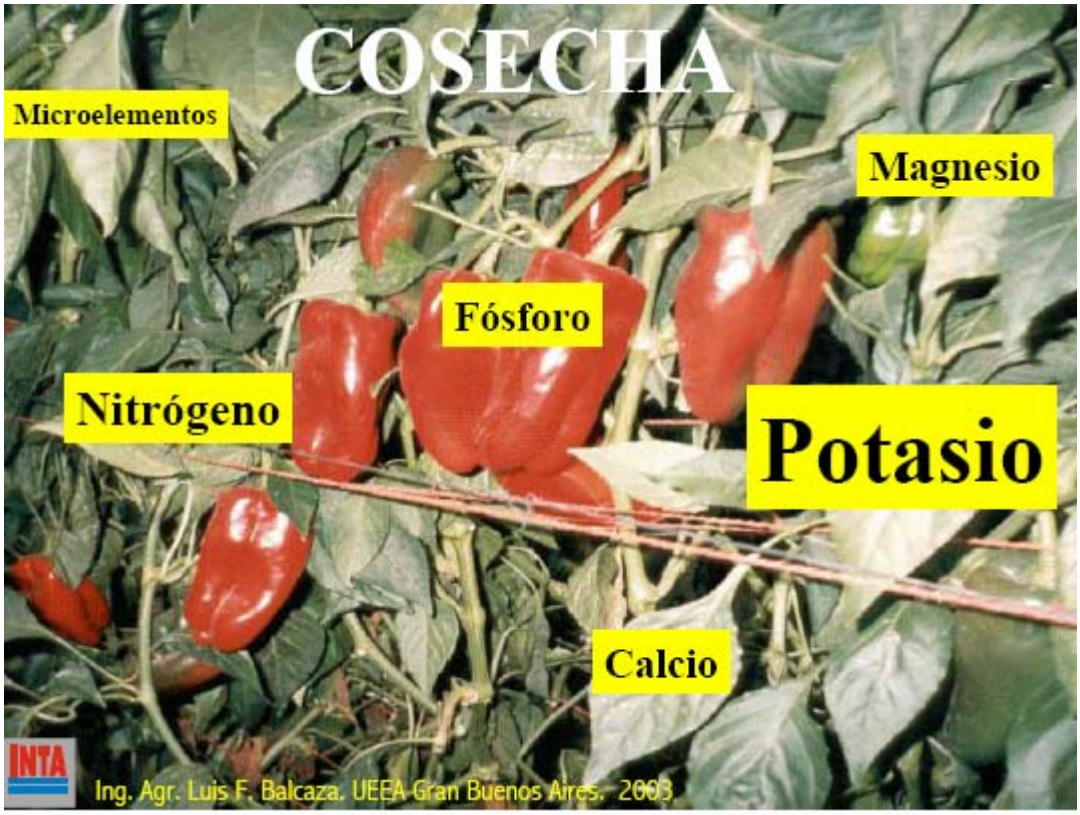


Figura 21. Cosecha del cultivo (Extraído de Balcaza L., 2007)

Para establecer las dosis más apropiadas, pueden tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- *Dosis de Nutrientes*

.- Cuando el cultivo es sembrado o transplantado, comenzar con pequeñas cantidades de fertilizantes
.- Incrementar la dosis a medida que la tasa de crecimiento del cultivo aumenta
.- A medida que el cultivo madura y el crecimiento disminuye, reducir las dosis
.- Para la mayoría de los cultivos, es suficiente programar no mas de 4 o 5 dosificaciones diferentes durante el ciclo del cultivo

- *Relación entre Nutrientes*

.- En las primeras etapas del cultivo, aplicar P y K para un buen enraizamiento y establecimiento de plántulas
.- Durante la etapa vegetativa, aplicar dosis adecuadas de N para un buen crecimiento y desarrollo.
.- Durante la etapa reproductiva, incrementar el K para un buen desarrollo de frutos y calidad de los mismos.
.- Reducir las dosis de N para evitar exceso de crecimiento vegetativo, frutos no firmes y problemas de pestes y enfermedades

En la Tabla 40 se ilustran algunas relaciones N:P:K a ser usadas en cultivos hortícolas en diferentes estadios fenológicos.

Tabla 40. Relaciones sugeridas para los diferentes estadios fenológicos de cultivos hortícolas. (Adaptado de Balcaza L, 1996)

Cultivo	Fase fenológica	N	P	K
Pepino	Emergencia-floración	1	0,18	1,08
	Floración-fructificación	1	0,18	1,41
	Fructificación-fin del cultivo	1	0,18	1,50
Frutilla	Transplante-floración	1	0,31	1,00
	Floración-inicio de cosecha	1	0,18	1,41
	Cosecha	1	0,18	1,50
Melón	Emergencia-floración	1	1,80	1,08
	Floración-fructificación	1	1,80	1,49
	Fructificación-fin de cultivo	1	1,80	1,41
Pimiento	Transplante-cuaje 1er fruto	1	0,13	1,00
	Cuaje 1er fruto-1ª cosecha	1	1,80	1,49
	1ª cosecha-fin de cultivo	1	0,22	1,58
Tomate	Transplante-1ª floración	1	0,22	0,83
	1ª floración-cuaje 3er racimo	1	0,13	1,08
	Cuaje 3er racimo-cuaje 6º racimo	1	0,13	1,41
	Cuaje 6º racimo-fin de cultivo	1	1,80	1,58

Controles durante la fertirrigación

Es importante monitorear la evolución de la fertirrigación. Este monitoreo, en situación de alta tecnología, se hace tanto en el vegetal como en el suelo. Existe la posibilidad de toma de muestra, tanto vegetal como de suelo y remisión a laboratorio. Este procedimiento demanda de más tiempo y posterga acciones correctivas en caso de presentarse anomalías. Por otro lado, existen sistemas más sofisticados de monitoreo in situ, tanto sobre vegetal como sobre suelo.

En las ilustraciones siguientes se muestran algunos de estos equipos (Figuras 22 y 23)

Figura 22.Extractor de solución de suelo y su colocación (Extraído de Balcaza L., 2007)

Figura 23. Equipo de monitoreo vegetal

Entre los controles más importantes a efectuar se encuentran:

1. pH del suelo: en caso de registrarse alteraciones del pH pueden ser corregidas durante la fertirrigación.
2. CE del suelo: de la misma manera que en el caso de pH, es conveniente que se monitoree la salinidad del suelo a los fines de corregir posibles efectos de aumentos de la variable.
3. Concentración de nutrientes en la solución edáfica: existen equipos especiales que permiten monitorear in situ la solución del suelo.

ALGUNOS EJEMPLOS DE FERTILIZACIÓN DE CULTIVOS TIPO

Dra. Mabel Vázquez

1.- PIMIENTO *(Adaptado de Balcaza L., 1995, 2007)*

Funciones de los nutrientes en el cultivo del pimiento

En el pimiento como en cualquier otro cultivo, los diferentes estadios fenológicos implican diferentes necesidades nutricionales. Se trata de un cultivo altamente demandante de nitrógeno, especialmente en la etapa de crecimiento vegetativo. En los suelos del Gran La Plata, el uso habitual de enmiendas orgánicas y altas dosis de fertilización, hacen que en general la provisión de este elemento sea buena. Por tal motivo, en general los planteos de fertilización, comienzan sin el aporte de este elemento. Cuando comienza la floración y cuaje de frutos es importante disminuir la dosis de *nitrógeno*, pues el exceso de este elemento provoca retraso en la maduración. Su deficiencia determina una reducción del desarrollo de la planta. Las hojas son pequeñas y amarillentas.

El *fósforo* es un elemento que incide en el desarrollo de raíces, por lo que es importante iniciar cualquier cultivo con alta provisión de este elemento, natural o aportada por los fertilizantes. Igualmente, tiene incidencia en los períodos de floración y formación de fruto. Su deficiencia puede estar asociada a bajos niveles térmicos, condición en que la solución del suelo se renueva poco y el crecimiento de las raíces para acceder a mayor volumen de suelo, también se reduce. Ya sea por bajo contenido de este elemento o por la condición térmica, la planta sufre de una notable disminución del crecimiento, las hojas son pequeñas y encorvadas hacia arriba, la nervadura se torna violácea-negruzca.

Si bien el *potasio* es un elemento generalmente muy bien provisto en los suelos de esta zona, es conveniente vigilar su disponibilidad, pues incide en aspectos como precocidad, firmeza y color de la fruta. La deficiencia de este elemento en el pimiento causa manchas negruzcas en el margen de la hoja que pueden finalmente necrosarse. Los entrenudos se acortan.

El pimiento es más exigente en *magnesio* en la fase de maduración. Es común encontrar deficiencias de este elemento en la 2º fase del cultivo, debido a que la demanda se incrementa por el aumento de iones competidores como potasio o amonio, o a causa de riegos insuficientes, debido a que se trata de un nutriente que se mueve por flujo masal, es decir es arrastrado en la solución del suelo por la corriente transpiratoria de la planta.

La dinámica suelo-planta del *calcio* es comparable a la del magnesio. La deficiencia de calcio puede provocar podredumbre apical del fruto, ya que este elemento forma pectatos de calcio, responsables de la estructura de las paredes celulares de la planta.

A título de ejemplo en la Tabla 41 se ilustra la composición de distintas variedades de pimiento.

Tabla 41. Composición de distintas variedades de pimiento (Adaptado de Watt et al, 1975)

	Pimiento dulce verde	**Pimiento dulce maduro**	**Pimiento picante verde**	**Pimiento picante maduro**
	(por 100 g de producto comestible)			
Agua (%)	93,4	90,7	88,8	80,3
Proteínas (g)	1,2	1,4	2,3	2,3
Grasas	0,2	0,3	0,2	0,4
Hidratos de carbono (%)	4,8	7,1	9,1	15,8
Fibra (g)	1,4	1,7	1,8	2,3
Cenizas (g)	0,4	0,5	0,6	1,2
Calcio (mg)	9	13	10	16
Fósforo (mg)	22	30	25	49
Hierro (mg)	0,7	0,6	0,7	1,4
Sodio (mg)	13	-	-	25
Potasio (mg)	213	-	-	564
Vitamina A (UI)	420	4450	770	21600
Tiamina (mg)	0,08	0,08	0,09	0,10
Riboflavina (mg)	0,08	0,08	0,06	0,20
Niacina (mg)	0,5	0,5	1,7	2,9
Acido ascórbico (mg)	128	204	235	369
Valor energético (cal)	22	31	37	65

Algunos investigadores han estimado que la extracción de un cultivo de pimiento *var Lamuyo*, recolectado en verde con un rendimiento de 370 kg/ha es de 3,36 kg de N/ha, 0,44 kg de P/ha, 5,20 kg de K/ha y 0,25 kg de Mg/ha. Si la recolección se efectúa sobre pimiento rojo es de 210 kg/ha de rendimiento, la extracción es de 4,1 kg de N/ha, 0,53 kg de P/ha, 5,6 kg de K/ha y 0,32 kg de Mg/ha (Cornillón, 1974).

Se trata de un cultivo con **pH** óptimo en el rango de 6-6,5. Por fuera de este rango se producen reducciones de disponibilidad de algunos nutrientes. A título de ejemplo, en condiciones de alcalinización a causa del agua de riego, se originan deficiencias de hierro, fósforo y manganeso. Por este motivo es necesario que la fertirrigación contemple el agregado de ácido fosfórico, sulfúrico o nítrico a los fines de mantener el pH en el rango mencionado en el agua de riego, o bien adicionar azufre o yeso al suelo en la preparación del terreno.

El pimiento es moderadamente tolerante a la salinidad. En general se aconseja que la **CE** no supere 1,5 dS/m, aunque regionalmente se han obtenido buenos resultados con CE cercana a 2 dS/m. Arango *et al* (2007) informaron que las plantas inoculadas con micorrizas del género Glomus intraradices en el sustrato de germinación, mejoró notablemente la resistencia a la salinidad y sequía del pimiento.

Diseño de la fertilización

El mismo se hace en base a los análisis de suelo, la calidad del agua de riego que se utilizará y el nivel de producción esperable. El programa de fertilización puede establecerse de 2 maneras. La 1ª se realiza en función de la demanda del cultivo en las distintas etapas fenológicas y la 2ª, es mantener una concentración de nutrientes en la solución del suelo considerada óptima para cada estadio fenológico, mediante el monitoreo permanente de la misma, lo cual implica el uso de equipamiento más sofisticado. Se trata de un cultivo sin sensibilidades específicas a los diferentes fertilizantes.

Si bien la recomendación de fertilización debe establecerse en base a los análisis de suelos, a título orientativo se dan a continuación algunas pautas.

Fertilización de cobertura

Las fases fenológicas que se establecen son:

- transplante: en general en suelos con antecedentes hortícolas, la disponibilidad es suficiente para el primer estadio. De no serlo, es común utilizar una mezcla de fertilizantes sólidos de:
    - nitrato de amonio 30%
    - fosfato diamónico 20%
    - nitrato de potasio 50%

De esta mezcla se agrega 1 kg/surco de 100 m, una vez en este período.

- cuaje de fruto de la cruz: en esta instancia puede iniciarse la fertirrigación en una relación nitrógeno:fósforo:potasio (N:P:K) de 1: 0,7-1: 1,3-1,6.

Si no se cuenta con fertirrigación puede usarse una mezcla de fertilizantes sólidos de

- nitrato de amonio 20%
- fosfato diamónico 20%
- nitrato de potasio 60%

De esta mezcla se agrega 1 kg/surco de 100 m, una vez en este período y una vez en el período siguiente (crecimiento frutos-inicio de cosecha).

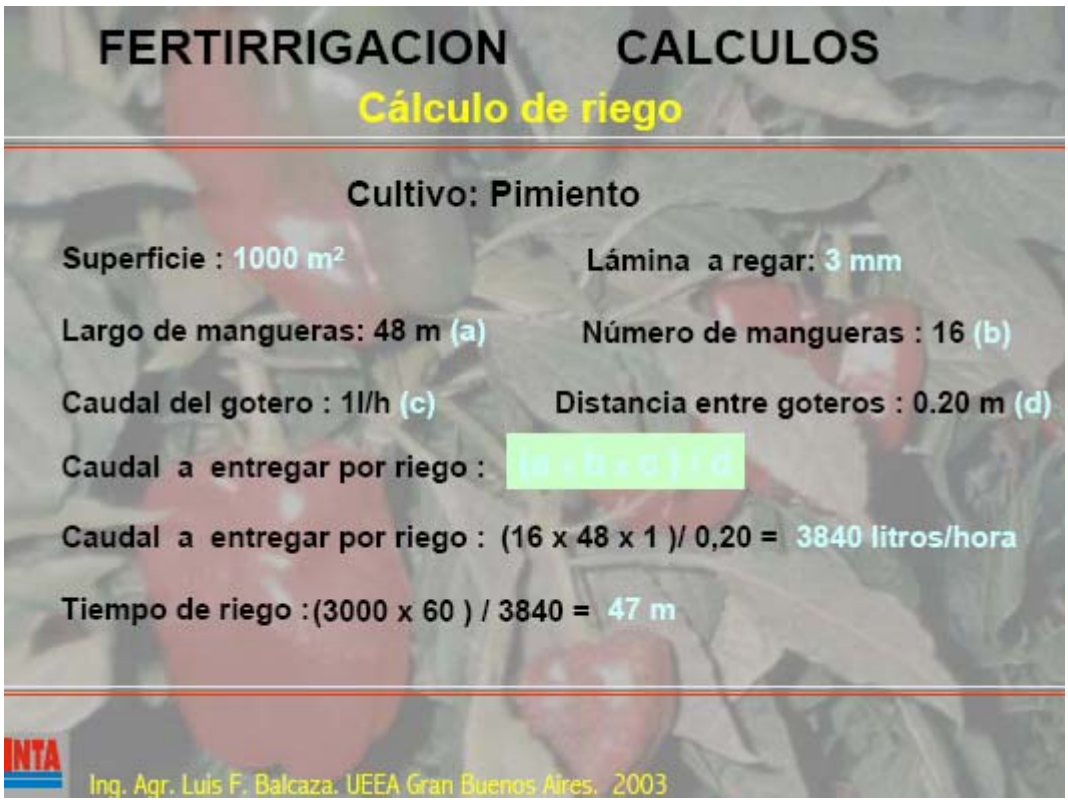
- crecimiento de los frutos a inicio de cosecha: en esta etapa es conveniente utilizar una relación N:P:K de 1: 0,6-0,8 : 1,7-1,85
- cosecha: mantener una relación N:P:K de 1: 0,6-0,8 : 1,8-2. De no contar con fertierrigación usar una mezcla de fertilizantes sólidos de

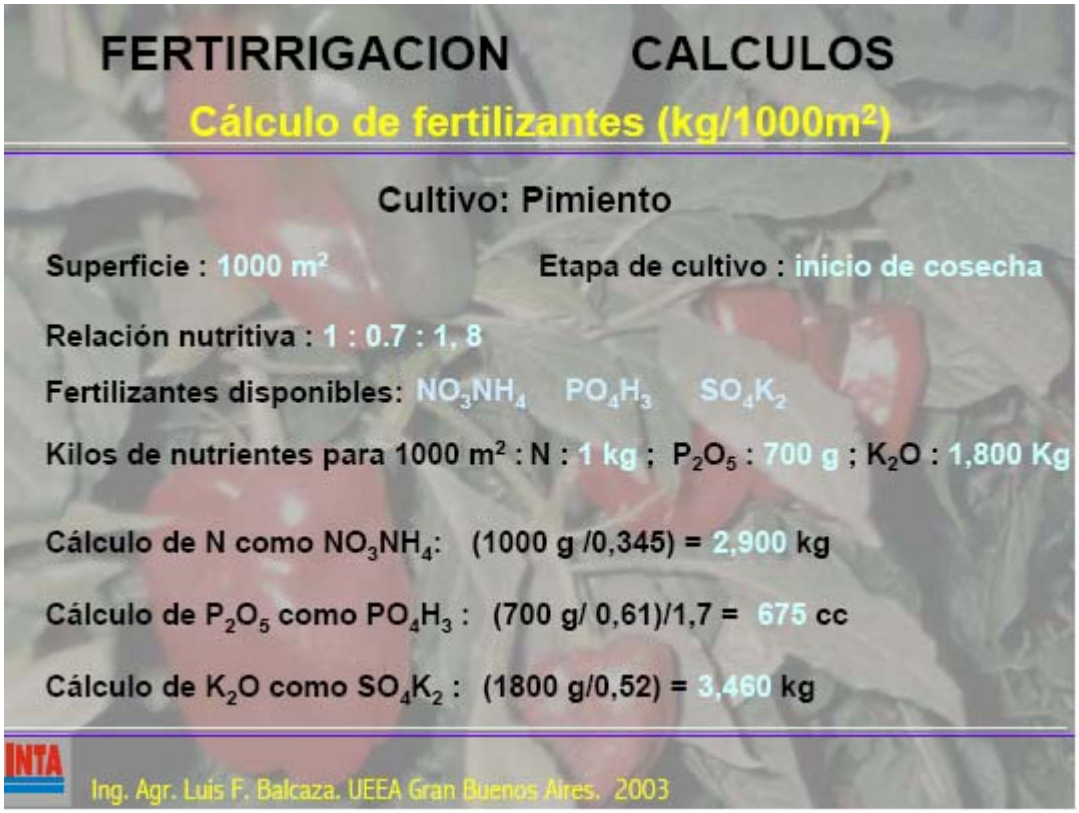
    - nitrato de amonio 15%
    - fosfato diamónico 15%
    - nitrato de potasio 70%

De esta mezcla se agrega 1 kg/surco de 100 m, cada 20 días.
En caso de podredumbre apical por falta de suministro de calcio, puede hacerse fertilización foliar con nitrato de calcio o quelato al 0,75-1%.

Fertirrigación

Ejercitación para el diseño de un programa de fertirriego en pimiento





2.- LECHUGA

La fertilización de lechuga, al igual que los otros cultivos hortícolas, debe variar en función del análisis de suelo y las características de la especie, pero particularmente en esta especie puede responder también a la forma de cultivo.

A título de ejemplo en la Tabla 42, se ilustra la extracción de nutrientes para diferentes rendimientos y cultivares.

Tabla 42. Extracción de nutrientes en lechuga

Rendimiento (t/ha)	**N**	**P**	**K**	**Ca**	**Mg**	**Variedad Modalidad**
	kg/ha					
25	55	8,8	99,6	24,9	6	Campo, primavera
24,3	67	12,3	105	20,6	5,8	Cultivo forzado
45	100	22	208	-	7,2	Invernadero
25	53	8,8	99,6	-	-	romana
25	52	8,8	41,5	-	-	arrepollada
18	45	4,8	44,8	6,4	2,7	-
47	106	13,6	193,4	36,2	13,2	-
62	113	57	235	-	-	Reina de Mayo
58	133	51	288	-	-	Maravilla de Invierno

Fuente: Maroto J., 2002

Desde el punto de vista de la absorción de los nutrientes, el ciclo de la lechuga puede dividirse en dos fases fenológicas: la primera que comienza con la emergencia de la planta y se prolonga hasta la formación de las primeras hojas internas. La otra fase, se extiende desde la aparición de las primeras hojas internas hasta el final del ciclo. Esta última etapa abarca los últimos 30 días del ciclo de cultivo (INTA Pergamino, 2007).

De las dos etapas mencionadas, en la segunda fase del cultivo (últimos 30 días antes de la cosecha), la lechuga absorbe el 50% de los nutrientes totales requeridos, y es en ese mismo momento en que tiene lugar la mayor producción de materia seca.

Las necesidades de nitrógeno aproximadas durante todo el ciclo son de 90-100 kg/ha. Estas cantidades se deben suministrar durante todo el ciclo del cultivo y nunca en una

sola oportunidad en dosis superiores a los 60 kg/ha de N. Para el diseño del plan de fertilización nitrogenado, se debe tener en cuenta el aporte de $N\text{-}NO_3^-$ del suelo, determinado a través de un muestreo y posterior análisis de laboratorio. La estrategia de fertilización debe cubrir aquella cantidad de N que la oferta edáfica no es capaz de proveer.

Dosis elevadas de *nitrógeno*, contrariamente a lo que ocurre en otras especies, no retarda la maduración, pues en este caso se cosecha parte vegetativa y no fruto (Maroto J., 2002), a menos que se trate de producción de semilla, donde el fenómeno puede aparecer. Es una especie de baja eficiencia en el uso de este nutriente, por lo que Welch *et al* (1983 está en Maroto 2002), recomendaron la adición de *nitrapirina* para mejorar su utilización.

El nitrógeno se divide en 3 o 4 aplicaciones, la 1ª de fondo inicial, la 2ª tras el aclareo, 15 días más tarde, la 3ª y la 4ª al inicio de la formación de la cabeza o estadío equivalente en variedades que no forman cabeza.

Con respecto al *potasio*, su absorción se encuentra relacionada con el nivel de *magnesio y calcio*, ya que un exceso de aquel, reduce la absorción de calcio y magnesio.

Tanto la deficiencia como el exceso de nutrientes puede impedir la formación de las cabezas en variedades de ese tipo. Cuando la dosis es excesiva, las plantas adquieren un porte aplastado. Stephan (1971) estableció una relación potasio/nitrógeno óptima para este especie en un rango de 3 para la primavera y aumentar a 4 en el invierno, pues tasas luminosas restrictivas reducen la fotosíntesis en esta estación, cosa que puede compensar el potasio. Sin embargo, dosis elevadas de potasio pueden inducir deficiencia relativa de magnesio. Se trata de una especie medianamente exigente en *boro* y muy exigente en *molibdeno*, particularmente en estadios jóvenes.

Los aportes de K en cultivos al aire libre se pueden fraccionar, pero no deben superar dosis de 200 kg/ha por aplicación. En cultivos de lechuga en invernáculo, con producciones entre 60 a 65 t/ha, se requieren alrededor de 166 a 290 kg/ha de K. El criterio de fertilización potásica es distinto al del N, debido a la menor movilidad de este nutriente en el suelo. Es difícil acceder a umbrales que se adapten a la gran variación de condiciones de manejo y ambientes de producción hortícola. En el caso de efectuar abonaduras con estiércoles u otros compuestos de origen orgánico, es importante considerar el aporte de nutrientes, que si bien es bajo en relación a las cantidades usualmente empleadas (25 a 30 t/ha) forma parte de la oferta de nutrientes al sistema.

Se trata de una especie muy sensible a la salinidad, particularmente en estadios jóvenes, por lo que fertilizaciones con productos de alto índice de salinidad en aplicaciones frecuente pueden ser perjudiciales.

3.- TOMATE

Como en otros cultivos hortícolas, un programa de fertilización de tomate debe tener en cuenta el contenido de nutrientes del suelo evaluado a través del análisis de suelo, y la extracción del cultivo, la cual varia según el rendimiento y características de la variedad. A título de ejemplo en la Tabla 43 se dan algunos datos de extracción del cultivo.

Tabla 43. Extracción de nutrientes del tomate

Rendimiento	**N**	**P**	**K**	**Mg**	**Variedad**
t/ha	**kg/ha**				
60	136	24,2	193	22	Moneymaker
50	290	42,2	564	45,6	Montfavet 63-5 sin despunte
86	242	30	350	45	Montfavet 63-5 (recolectando 9 pisos y acolchado)
67	322	25	367	32,4	Florida

Fuente: Maroto J., 2002

Los requerimientos no son uniformes a lo largo del ciclo del cultivo. Así en la etapa que va desde el transplante hasta el cuaje de la 1ª corona absorbe aproximadamente el 10% de cada nutriente. En las 6-7 semanas siguientes toma entre el 70-80% del total.

El *nitrógeno* influye principalmente en las primeras etapas del cultivo y fundamentalmente en el llenado de los frutos. Un exceso de nitrógeno puede conducir a un desarrollo vegetativo demasiado exuberante, en detrimento de la fructificación. En las primeras fertilizaciones es conveniente guardar una relación nitrógeno/potasio de 1:1,7. Cuando se esté produciendo la floración del 3er o 4º racimo, la proporción debe ser de 1:0,8 y en plena floración se eleva de nuevo a 1:1,7.

El *fósforo*, como en muchos otros cultivos, incide en el desarrollo del sistema radical y afecta también la floración, fecundación y maduración. Tiene una fuerte acción sobre la precocidad.

El *potasio* es el elemento al que se le adjudica especial importancia sobre la firmeza de la piel del fruto y su calidad (pH, acidez, peso seco, sólidos solubles, color y susceptibilidad a la decoloración). Sus necesidades aumentan con la disminución de la

luminosidad. Amma y del Pardo (2007) informaron que la fertilización potásica de un suelo con 3,07 meq de K/100 g no mejoró ni el rendimiento ni la calidad visual del fruto de tomate redondo cultivar Superman, en suelos en un suelo de la serie Ramallo. Por lo que el análisis se torna indispensable.

Trabajos de Giardina *et al* (2007) demostraron que el agregado de *calcio* en forma de quelatos (11%) en dosis de 7 ml/m^2 produjo un aumento del número de frutos cuajados y del 36% del rendimiento en comparación con testigos no fertilizados de tomate platense.

Para cada estadio fenológico deben satisfacerse los niveles de nutrientes que se señalan el Tabla 44.

Tabla 44. Niveles de nutrientes considerados óptimos en la solución de fertirriego para el cultivo de tomate en sus distintos estadios fenológicos

Estadio	**N**	**P**	**K**	**N**	**P**	**K**
	(g/m^3 = ppm)			**relaciones**		
Transplante-floración	60	13,2	50	1	0,22	0,83
Floración-cuaje 1er racimo	150	33	158	1	0,22	1,05
Cuaje 1er rac.-6º racimo	200	44	415	1	0,22	2,08
Cuaje 6º rac.-fin de cosecha	180	22	249	1	0,12	1,38

Fuente:Adaptado de Balcaza L., 1995; Mollinedo *et al*, 2007.

Si bien para satisfacer los requerimientos de fertilización debe hacerse el análisis de suelo correspondiente, sólo de manera orientativa, se dan algunas cantidades a aplicar en fertirriego (Adpatado de Balcaza L., 1995):

- transplante – floración:
  - nitrato de amonio 125 g/m^3 solución
  - ácido fosfórico 50 g/m^3 solución
  - nitrato de potasio 130 g/m^3 solución

  Esta solución tiene una CE aproximada de 342 micromohs/cm

- floración-cuaje 1er racimo:
  - nitrato de amonio 265 g/m^3 solución
  - ácido fosfórico 120 g/m^3 solución
  - nitrato de potasio 455 g/m^3 solución

  Esta solución tiene una CE aproximada de 719 micromohs/cm

- cuaje 1er racimo-cuaje 6º racimo:
  - nitrato de amonio 150 g/m^3 solución
  - ácido fosfórico 160 g/m^3 solución
  - nitrato de potasio 1150 g/m^3 solución

  Esta solución tiene una CE aproximada de 1675 micromohs/cm

- cuaje 6º racimo-fin de cosecha:
  - nitrato de amonio 265 g/m^3 solución
  - ácido fosfórico 80 g/m^3 solución
  - nitrato de potasio 680 g/m^3 solución

  Esta solución tiene una CE aproximada de 1240 micromohs/cm

Mollinedo *et al* (2007) informaron que utilizando agua de riego de pH 7,6 y CE de 1,29 mmohs/cm en híbridos de tomate *Margarita, Marta y Silvero*, soluciones de relación N:P:K:Ca:Mg 1:0,2:0,83:0,4:0 de inicio a cuaje y de 1:0,2:1,5:0:0,3 de cuaje en adelante, con contenidos de 0,8 y 1,2 g de fertilizante/l de solución, redujeron el rendimiento respecto

de soluciones de 0,4 g/l, posiblemente a causa de la salinidad generada. Por lo que las dosis están estrechamente ligadas a la calidad del agua de riego, aunque se mantengan las relaciones consideradas óptimas. Sin embargo Agüero *et al* (2007) encontraron que los híbridos *Tavira y Eco* aumentaron el rendimiento con el aumento de la dosis en condiciones comparables de ensayo. Esto permite deducir que dosis-salinidad del agua-material genético, deben evaluarse particularizadamente para definir las estrategias de fertilización.

Recientes estudios de Vita *et al* (2007) demostraron que la inoculación con Azospirillum brasilense produjo un aumento del 56% en el número de frutos/planta en tomate platense en el Gran La Plata.

ENMIENDAS ORGÁNICAS

Ing. Ftal. Pablo R. Gelati

Materia orgánica del suelo

En los suelos minerales, la fracción orgánica está compuesta por humus, restos vegetales, animales y microorganismos. El humus o materia orgánica humificada, es de características coloidales y color oscuro, resulta de la transformación y resíntesis de residuos vegetales y animales por microorganismos en el suelo. Una parte de este humus, las huminas, se asocia a la fracción arcilla, formando los complejos arcillo-húmicos. En estas condiciones la materia orgánica queda protegida y puede permanecer en el suelo por centurias. El estudio de los componentes de la materia orgánica es utilizado como indicador de calidad de suelos.

Efectos de la materia orgánica sobre las propiedades del suelo

La materia orgánica tiene funciones múltiples. Entre las principales se pueden citar:

a) Físicas:

1. otorgando friabilidad a suelos arcillosos
2. formación y estabilidad de la estructura del suelo
3. favorece la infiltración, retención hídrica y evacuación de excesos de agua en profundidad
4. aumenta la aireación
5. disminuye el riesgo de erosión

b) Químicas:

- aumenta la capacidad de retención de nutrientes catiónicos (calcio, magnesio, potasio, etc.)
- es el principal reservorio de nitrógeno y azufre del suelo
- atenúa las variaciones de acidez o alcalinidad

c) Biológicas:

- es fuente de energía para los microorganismos, muchos de ellos benéficos
- es fuente de sustancias hormonales y enzimáticas que favorecen la actividad biológica

Cuando un suelo es puesto en producción, los niveles de materia orgánica se modifican, encontrando un nuevo equilibrio compatible con las prácticas culturales y los cultivos realizados. Esta modificación de la materia orgánica es tanto en aspectos cuantitativos como cualitativos y redunda en perjuicios a nivel de sus múltiples funciones. En suelos del Pdo. de La Plata que han sido decapitados para fabricar ladrillos, se produce una pérdida superior al 85% de la capacidad productiva original. Esta disminución en la fertilidad es causada, principalmente, por alteraciones físicas. La capa subsuperficial que queda expuesta, tiene muy bajo contenido de materia orgánica en relación al porcentaje de arcilla. Esto redunda en alta microporosidad y reduce drásticamente el movimiento del agua en profundidad, dificulta el intercambio gaseoso con la atmósfera, hace que se comporte dura o muy dura en seco y firme a muy firme en húmedo. El crecimiento vegetal en estas condiciones se ve reducido.

Enmiendas y fertilizantes orgánicos

Es una práctica generalizada entre los productores hortícolas y florícolas de la zona, el agregado de materia orgánica (abonos y/o enmiendas orgánicos) para mantener o recuperar suelos degradados por este tipo de producción. La materia orgánica aportada es de distintos orígenes, entre los que se destacan, gallinaza, cascarilla de arroz, contenido ruminal, proveniente de frigoríficos y camas de stud. También se utiliza chipeado de podas y otros restos orgánicos, los que constituyen una importante fuente de materia prima para la humificación en el suelo. Simultáneamente al aprovechamiento del recurso, se evita la depositación de estos residuos en vertederos, volviéndose, en muchos casos, focos de contaminación.Según las normativas, (Ley de Fertilizantes y Enmiendas del SENASA, (Ley Nacional 20466) debe entenderse:

Enmienda es toda sustancia o mezcla de sustancias de carácter mineral u orgánico, que incorporada al suelo modifique favorablemente sus caracteres físicos o físico-químicos, sin tener en cuenta su valor como fertilizante. A modo de ejemplo, mencionamos, yeso, cal, turba compost y lombricompuesto, entre otros.

Fertilizante orgánico es toda sustancia o mezcla de sustancias orgánicas donde la sumatoria de nitrógeno, fósforo y potasio, todos como elemento, deberá ser del 5% o más, y la relación carbono – nitrógeno (C/N) menor a 20 (20/1).

El SENASA, controla y establece, los límites admisibles de ***metales pesados***, orgánicos traza y ***patógenos***, tanto en enmiendas como en los fertilizantes orgánicos para uso agrícola. La ***salinidad*** y el ***pH***, son factores importantes a considerar a los fines de elegir el tipo de enmienda o fertilizante orgánico a utilizar, sobre todo en suelos como los de La Plata, que tienen elevado contenido de arcilla en profundidad y alta capacidad para retener iones. Entre los elementos aportados en abonos orgánicos de residuos animales, es común encontrar abundancia de sodio, utilizado en la composición de las dietas animales, el cual deteriora la estructura y su estabilidad, reduciendo el drenaje y la capacidad de lavado (Ver item "Problemáticas de índole química en los suelos").

Compost, su elaboración

El compostado, es un proceso microbiano aeróbico. Se caracteriza por tener una etapa inicial mesófila (temperatura cercana a la ambiental), un período de elevación de temperatura, que puede llegar hasta los 70 ºC y una etapa final de maduración mesófila, dando como resultado una materia orgánica estabilizada y minerales (Figura 24). El proceso de compostado, produce un material distinto en características físicas y químicas y biológicas a la materia prima inicial.La materia orgánica así estabilizada, tiene la ventaja de reducir efectivamente los patógenos que pudiera portar, eliminar los olores desagradables, reducir la viabilidad de las semillas de malezas, liberar lentamente a los nutrientes que contiene y cuenta con precursores que permiten la síntesis del humus del suelo propiamente dicho.

Todos los estiércoles y restos orgánicos deben compostarse antes de ser utilizados como enmiendas o fertilizantes orgánicos. El compost, además, según sus características, puede emplearse en proporciones adecuadas para la elaboración de sustratos, de amplio empleo en plantineras y viveros.

Se pueden compostar, siempre que se asegure cumplir con las condiciones adecuadas de reducción de patógenos y niveles de contaminantes por debajo de los límites propuestos por el SENASA, los siguientes residuos, entre los principales:

- estiércoles provenientes de diversas camas
- el contenido ruminal, proveniente de frigoríficos
- chipeado de podas, mantenimiento de parques
- residuos cloacales (biosólidos)
- residuos industriales orgánicos

Es común la mezcla de diversos materiales para obtener las condiciones ideales del compostado. Un aspecto a considerar en la selección de los materiales, es su relación carbono/nitrógeno (C/N). Cuando se agregan residuos con alta relación, como por ejemplo, virutas de madera, los microorganismos producen la inmovilización de nitrógeno del suelo, provocando la deficiencia temporaria de este nutriente para los cultivos. La reducción en la relación C/N de los materiales compostados, inferior a 20, evita este proceso. Por otro lado, residuos con relaciones C/N muy bajas favorecen la mineralización en exceso del nitrógeno contenido en el residuo, produciendo lixiviaciones que contaminan los cuerpos de aguas. Otra ventaja del compostado es que evita posibles elevaciones de temperatura que afectan los cultivos.

A modo de ejemplo se enumeran algunos elementos apropiados para armar las mezclas de residuos a ser compostados, en función de la relación C/N (Tabla 45).

Tabla 45. Contenido de nitrógeno (%) y relación carbono/nitrógeno de diferentes materiales utilizados en mezclas para comportar

.

Material	**N/peso seco** (%)	**C/N**
Orinas de animales	15-18	0,8
Sangre seca	10-14	3
Harina de pescado	4-10	4-5
Cama de aves	4,0	2-8
Estiércol vacuno	1,0 – 1,8	sd
Paja de trigo	0,6	80
Aserrín	0,1	500

Fuente: adaptado de Lilian Frioni (1999)

El compostado puede hacerse en pilas con volteos o con pilas estáticas, estas últimas deben tener ventilación forzada para asegurar la provisión de aire al proceso evitando putrefacciones.

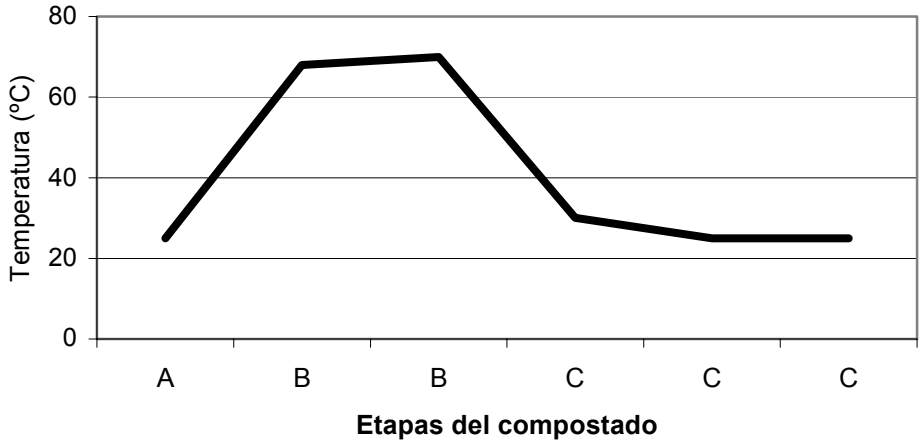


Figura 24. Etapas del compostado en función de las temperaturas. En el eje de las abscisas están indicadas las etapas: A, mesófila inicial, B termófila y C de maduración mesófila

Para realizar un compostado con volteo periódicos, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

a) ***Masa crítica***: se trata de la mínima necesaria para alcanzar las condiciones del proceso. Es necesario, acumular una cantidad mayor o igual a ella. La misma está relacionada además de las características propias de la material con la forma y tamaño de la misma.

b) ***Forma y tamaño de la pila***: ambos factores inciden en el compostado. Las dimensiones variarán en función de los volúmenes y tecnología aplicada, pero en general, son recomendables alturas entre 1,5 y 2 m, ancho mayor a 2 m y largos variables, mayores a 2 m (Figura 25).
c) ***Relación C/N***: cercana a 25–35/1. Relaciones mayores, características de residuos pajosos o virutas de madera, debería ser corregida mezclando materiales hasta obtener las valores de relación C/N sugeridos. Generalmente, el nitrógeno es el elemento deficitario y clave del proceso.
d) ***pH***: deberá estár en un rango de 6 a 7,5. Los extremos, dificultan la actividad microbiana, y por ende retardan el proceso.
e) ***Humedad:*** es indispensable para la actividad microbiana, valores próximos al 50 - 65 %, son ideales. La humedad debería ser provista por riego. Controlar la calidad del agua empleada, redundará en la calidad del producto final, más en nuestra zona donde dominan las aguas bicarbonatadas sódicas.

Una vez dispuesto el material, en la primer etapa, son consumidos principalmente los elementos fácilmente degradables y se genera calor que favorece la siguiente etapa. En la fase termófila, se produce una elevación de temperatura, que puede llegar a los 70 ºC, cuando las condiciones son óptimas y culminará cuando se agoten los nutrientes fácilmente empleados por los microorganismos termófilos. (Figura 25). El volteo periódico de las pilas, tiene la función de airear y homogenizar las condiciones de exposición a altas temperaturas de todo el material, permitiendo la eliminación de patógenos y semillas de maleza. La adecuada aireación, favorecerá la elevación de temperatura y tiene estrecha relación con la humedad. Incide en la capacidad de aireación, la granulometría de la pila. Los materiales finos, tienden a compactarse, por lo que es necesario, mezclarlos con virutas de madera, pajas y compost gruesos.

La temperatura del compost, en la etapa termófila, es independiente de la ambiente y nos da una idea de la evolución de la pila, pues resulta de la combinación de los factores anteriores. El proceso termófilo puede acelerarse y/o intensificarse con el adecuado manejo de los parámetros arriba desarrollados, recordando que el proceso es aeróbico, y la aparición de olores desagradables, indica procesos de fermentación y putrefacción.

Figura 25. Pilas de compostaje al aire libre, en etapa termófila, remoción con maquinaria. Se observa el vapor que sale de las pilas luego del volteo. Las fotos corresponden a distintos lugares

Para obtener un compost de uso sin limitaciones, una de las exigencias del SENASA, es que se controle el proceso de compostado. Cuando se hace en pilas con volteos periódicos, se deben alcanzar temperaturas mayores o iguales a 55 ºC, durante 15 días, con al menos 5 volteos. También debe obtenerse menos de 1000 NMP (número más probable) de coliformes fecales por gramo de materia seca, luego del proceso. Los lixiviados, producidos por el exceso de riego, deben ser adecuadamente controlados y manejados, pues son contaminantes de cursos de agua.

La etapa de maduración, es mesófila, y en ella ocurre una lenta degradación de la materia orgánica, a cargo de hongos y bacterias. Pueden aparecer lombrices e insectos. El compost maduro puede pasarse por una zaranda para obtener distintas granulometrías, según el uso final (Figuras 26 y 27). Cuanto más fino sea, mayor será la rapidez con que actuará sobre las propiedades del suelo. Los compost gruesos, tienden a mineralizarse más lentamente.

Figura 26. Extracción mecánica de compost bruto, sin tamizar. El compostaje fue realizado bajo techo

Figura 27. Compost maduro, zarandeado, acumulado bajo techo, para evitar las lluvias, en condiciones de buena ventilación

Cumplidos los requisitos de la etapa termófila, en cuanto a temperaturas y tiempos, cuando comienza a descender la temperatura de la pila, el compost joven puede ser distribuido en cunas, que por lo general tienen dimensiones variables pero alturas menores a 0,5 m para ser eventualmente **lombricompostado**, empleando lombrices rojas o californianas (*Eisenia foetida*) (Figuras 28 y 29). En esta etapa, es fundamental el control de la humedad, 50 al 70% y temperaturas 15 y 30ºC para asegurar el proceso. La relación entre el volumen de lombricompuesto a obtener por unidad de compost, es de aproximadamente 60- 80%. Las lombrices emplean el compost jóven como alimento y las deyecciones constituyen el lombricompuesto o vermicompost, el cual luego de haber sido digerido por las lombrices, y extraídas ´debe ser acondicionado para su maduración, el cual es un proceso microbiano.

Una vez maduro el material puede ser zarandeado para obtener distintas granulometrías según usos. El proceso de lombricompostado y maduración lleva aproximadamente de 6 a 9 meses. El producto final es un material finamente dividido, de aspecto similar a la borra del café, olor a tierra húmeda y alta estabilidad. Tiene elevados valores de materia orgánica estabilizada, con precursores húmicos. El proceso de concentración produce un aumento de nutrientes respecto de las materias primas iniciales y es enriquecido por el complejo enzimático del tracto digestivo de las lombrices.

Si bien el lombricompostaje puede emplearse a cualquier escala de trabajo, es un proceso adecuado para tratar pequeños volúmenes de residuos y obtener un producto de alta calidad y rápida reacción en el suelo.

Figura 28. Distribución del compost joven en lechos para el lombricompostado. Se aprecia el sistema de riego en el lecho

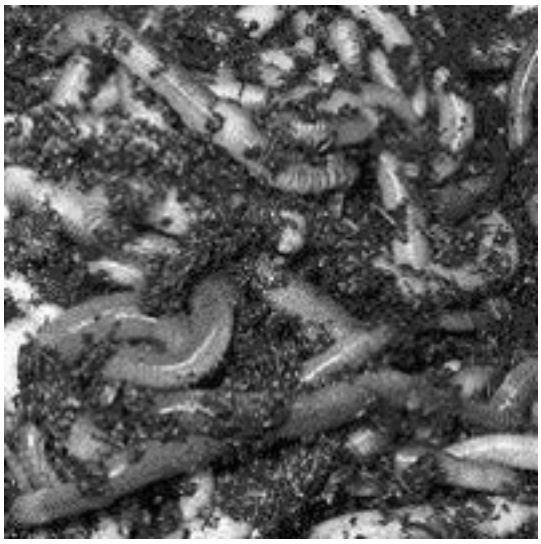


Figura 29. Puñado de Lombrices rojas, con lombricompuesto. Se puede apreciar la granulometría fina del material producido

Usos de abonos y compost

En la Tabla 46, se presentan rangos en los contenidos de los macronutrientes en diferentes abonos orgánicos y otras propiedades químicas. La variabilidad del rango, está dada por la heterogeneidad de los productos analizados.

Tabla 46. Contenido en nitrógeno, fósforo y potasio de distintos estiércoles y compost

Abono	N	P_2O_5	K_2O
	(%)		
Gallinaza	1,1 – 4	0,5 – 3,2	0,5 – 1,9
Estiércol de vaca	0,5 – 0,7	0,2 – 0,3	0,5 – 0,65
Estiércol de oveja	1,0 – 2,0	0,75 – 1,0	0,5 – 65
Estiércol de caballo	0,65 – 1,0	0,25 – 0,75	0,60 – 0,85
Estiércol de cabra	2,8	1,8	2,8
Estiércol de conejo	2,0	1,3	1,2
Lombricompuesto	1,5 – 2,0	2,0 – 3,0	2,0 – 3,0

Fuente: adaptado de http://www.fertilizando.com/artículos/

Tabla 47. Características químicas de diferentes abonos orgánicos

Parámetro	Unidades	Compost	Gallinaza	Lombricompuesto	Biosólidos	Cáscara de arroz
pH		6,0 – 8,0	7,5	6,4 -7,3	6,0 - 8,0	6,7
CE[1]	dS m^{-1}	1,2 – 6,0	25,4	1,2 - 6,7	1,0 - 10	0,9
MO[2]	%	30 - 70	36,2	30 - 85	30,0 - 70,0	81,0
C	%	10,0 - 30,0	28,7	10 - 30	23,0	sd
Nt	%	0,6 - 2,0	5,5	1,0 – 2,0	1,9	sd
C/N		9,5 - 15	5,0	10 - 15	12,1	sd
Pt[3]	%	sd	0,4	0,2 - 0,9	1,4	sd
Kt[4]	%	sd	3,5	sd	1,0	sd
Nat[5]	%	sd	4,3	sd	sd	sd

Fuente: elaborada en base a resultados del grupo CRUB (UNCo) y laboratorio de Edafología, UNLP
Referencias: 1: Conductividad eléctrica, 2: materia orgánica, 3: fósforo total, 4: potasio total, 5: sodio total

Como puede verse en las tablas citadas, los materiales aquí detallados, aportan principalmente materia orgánica, mientras que el aporte de nutrientes es variable. Los valores son orientativos, pues dependen del sustrato inicial.

Las dosis de enmiendas recomendadas en la bibliografía, varían de 10 a 80 t/ha.

En suelos de La Plata, con producción intensiva, se aplican dosis cercanas a las 40 t/ha con buenos resultados. Es común, también, el empleo de gallinaza cruda o con algún período de estacionamiento. Como se observa en la Tabla 47, la misma tiene elevado contenido de nutrientes, lo que la calificaría como fertilizante orgánico. Sin embargo, el contenido de sodio es elevado. Por ello en caso de usarse la dosis mencionada, este abono haría un aporte de 1,7 t/ha de sodio. Este elemento es de por sí deteriorante de las propiedades físicas, saliniza el suelo y es fitotóxico, requiriendo de tratamientos con yeso y lavados con agua de buena calidad o lluvia para su utilización. Otro inconveniente que presenta la gallinaza, es la baja relación C/N, cercana a 5, lo que induce a lixiviación de nitrógeno subsuperficial y consecuente contaminación de napas. En los suelos de la zona, con un elevado contenido de arcilla subsuperficial, y superficial en caso de estar decapitados, la magnitud de los perjuicios producidos por la sodificación es aún mayor, pues el drenaje y evacuación de excesos salinos, es reducida por la muy baja conductividad hidráulica de los mismos.

Diversos investigadores estudiaron el empleo de biosólidos en suelos. Civiera y Lavado (2006) trabajaron sobre las modificaciones físicas en un suelo decapitado de Bs As, luego de tratarlo con distintas enmiendas que contienen biosólidos, comprobando mejoras en los parámetros densidad aparente e infiltración.

Un grupo de investigadores de la Universidad Nacional del Comahue (CRUB) viene llevando a cabo diversas investigaciones en la ciudad de Bariloche. A raíz de estas investigaciones se construyó una planta de compostado, donde se obtienen aproximadamente 4000 m^3/año de material tratado. Este compost ha sido calificado para su uso sin limitaciones por SENASA, a partir del monitoreo y evaluación periódica del proceso de compostado y análisis del producto obtenido. Las dosis recomendadas para su uso varían de 10 a 40 t/ha. Generalmente el compost de biosólidos tiene mayor contenido de fósforo, que otros compost, por lo que dosis excesivas, pueden causar contaminación con este elemento.

PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE LA FERTILIZACIÓN Y EL ABONADO

Luciano Juan

La alta exigencia nutricional de los cultivos hortícolas, sumada a la intensa sucesión de ciclos productivos de pocas especies cultivadas, resulta en una alta tasa de extracción de nutrientes esenciales del suelo. Para mantener altos niveles de rendimiento y calidad, se hace indispensable el agregado de los mismos desde fuentes externas al sistema.

A los fines de obtener un nivel de rendimiento determinado, cada cultivo, requiere disponer de los elementos nutricionales necesarios. A partir de la información proveniente del análisis de suelo y de las necesidades específicas de los cultivos, debe diseñarse un plan de fertilización teniendo en cuenta, además, las distintas etapas fenológicas y la variación de requerimientos asociada a las mismas. Estos aspectos se han desarrollado in extenso en capítulos precedentes.

Al aportar nutrientes al suelo, cualquiera sea su forma, ya sea como fertilizantes inorgánicos de síntesis o como abonos orgánicos, los mismos pueden sufrir los siguientes procesos:

- Ser rápidamente asimilados por las plantas (esta es la fracción aprovechada)
- Encontrarse en formas disponibles pero no absorbidos
- Ser fijados, con lo que salen del ciclo por largo tiempo
- Perderse lejos de la zona radical

De acuerdo con lo anterior, las plantas solo aprovechan una fracción de los nutrientes aplicados. El resto permanece de distintas maneras en el sistema suelo o sale de él. Es por este motivo que si bien la fertilización genera un aumento de la producción, deben tenerse en cuenta que pueden existir aspectos negativos. De la misma mane, los abonos orgánicos o las enmiendas orgánicas, pueden acarrear diversos problemas relacionados con su composición y/o carga microbiana. Los fertilizantes han contribuido al mejoramiento de la productividad de la agricultura pero su empleo excesivo ocasiona graves problemas por lo que es necesario llegar a un equilibrio entre la productividad de los agroecosistemas, su rentabilidad, su impacto en el ámbito social rural y su capacidad de sostenerse en el tiempo. En los últimos años y sobre todo en los países desarrollados, la sociedad esta demandando que la agricultura sea mas respetuosa con el medio ambiente, y en particular que se reduzcan las posibles fuentes de contaminación producidas por las prácticas agrícolas (Consigli 2000). Se ha focalizado el interés en minimizar los efectos potencialmente adversos del uso de fertilizantes sobre el ambiente (Darwich, 1998). De esta manera, se intenta mejorar la sustentabilidad de los agroecosistemas disminuyendo las amenazas que las prácticas actuales provocan para las futuras generaciones.

Como productores responsables de los mismos, inmersos en un tejido social con demandas y cuestionamientos cada vez mas volcados hacia el uso racional de los recursos naturales y la disminución de los impactos negativos de la agricultura, es imprescindible adquirir conocimientos que permitan manejar de manera más eficiente el agregado de nutrientes a los cultivos.

La fertilización (inorgánica, orgánica) afecta al medio ambiente de múltiples formas dependiendo fundamentalmente de las características propias de cada elemento. Los impactos negativos de esta práctica, pueden agruparse de la siguiente manera:

- Sustancias tóxicas

- Niveles excesivos de nutrientes
- Contaminación microbiológica
- Contaminación de acuíferos

Sustancias tóxicas

El agregado de nutrientes en forma de compost, cuando estos provienen de residuos urbanos o de materiales de desecho industrial, puede incrementar el nivel de metales pesados presentes en el suelo hasta niveles que no solo pongan en riesgo la producción, sino también la salud humana.
Los fertilizantes artificiales y naturales que se usan frecuentemente, tienen en su composición cantidades mínimas de metales pesados. El uso continuo y en grandes cantidades de los mismos, se genera una acumulación lógica de elementos nocivos para los cultivos, como puede verse en la Tabla 48.

Tabla 48. Tenor de micronutrientes y de otros minerales pesados en fertilizantes de acuerdo con la literatura internacional

Fertilizante/ enmienda	Boro	Cobalto	Cobre	Zinc	Arsénico	Cromo
			ppm			
Urea	-	0-5	0-80	0-50	-	0-50
DAP	10-200	-	-	-	20-350	-
SPT	0-800	1-4	0-215	0-140	0-1100	-
Nitrato de Amonio	-	-	-	0-5	-	-
Sulfato de Amonio	0-100	0-110	0-800	1-20	0-414	1-4,4
Sulfato de Potasio	0-500	-	0-300	-	0-400	2-5
Cama de pollo	-	2	31	155	0,57	6
Estiércol de vaca	24	5,9	62	71	4	56

Fuente: Malavolta E. (1994)

En la Tabla 49 pueden apreciarse los rangos de concentración considerados excesivos desde el punto de vista de la fototoxicidad. Estas concentraciones permiten prever que los niveles en los cuales dichos elementos afectan a los cultivos, son susceptibles de ser alcanzados en el largo plazo en sistemas productivos con altas tasa de fertilización como son la horticultura y floricultura.

Tabla 49. Concentraciones totales de elementos consideradas excesivas desde el punto de vista de la fototoxicidad

Elemento	Concentración (ppm)
Boro	25-100
Cobalto	25-50
Cobre	60-125
Zinc	70-400
Arsénico	15-50
Cromo	75-100

Fuente: Malavolta E., 1994

Niveles excesivos de nutrientes

Como se mencionó anteriormente, las características particulares de cada elemento condicionan el comportamiento que los mismos tendrán al aplicarse en exceso. Un caso particular en este sentido lo constituye el fósforo (P). El P disponible proveniente de los fertilizantes aplicados, se fija químicamente a través de diferentes reacciones formando compuestos insolubles. Esto se acentúa aún más en suelos con pH ácido formando complejos con los óxidos de hierro y aluminio. Por otro lado, en suelos básicos se forman precipitados con el calcio. La fijación de los fosfatos es un serio problema para las zonas de cultivos a causa de estas formas poco móviles. Una sobrefertilización continua con P provoca una acumulación desmedida, la que puede generar disminución en la capacidad de absorción de otros nutrientes, por interacciones negativas con ellos y hasta toxicidad del propio elemento en los cultivos. Es común observar que en cultivos florícolas del Gran La Plata, fertilizados con dosis frecuentes y altas de fertilizantes fosforados, lo que constituye un manejo tradicional de varias comunidades productivas, se produzcan severas alteraciones del crecimiento de las plantas, por ejemplo los crisantemos. Esta situación es prácticamente irreversible, cuando se trata de fósforo, por lo que los productores se ven obligados a abandonar la tierra, o en algunos casos a optar por comprar tierra y cubrir la de sus invernáculos, con un grave perjuicio económico para él y un daño ambiental severo en el área de decapitación.

Cada elemento en particular, resulta susceptible de acumularse o ser lixiviado fuera del alcance de las raíces de acuerdo a sus características de solubilidad o retención en el complejo coloidal del suelo y en consecuencia movilidad. Podría establecerse en orden decreciente de movilidad el siguiente listado de nutrientes: nitrógeno > potasio > azufre > magnesio > calcio > fósforo.

Es importante recordar que la nutrición vegetal será más eficiente en tanto exista un equilibrio entre todos los nutrientes necesarios y que el exceso de alguno de ellos puede resultar tan perjudicial como su ausencia.

Contaminación microbiológica

La utilización de estiércoles o materiales cloacales sin el debido compostado puede ser fuente de introducción de especies bacterianas nocivas para el hombre como *Escherichia coli*. Los beneficios que trae el uso de estiércoles como fertilizantes para los cultivos son bien conocidos tanto por sus cualidades nutricionales, como el aporte de materia orgánica y sus beneficios sobre otras propiedades físicas o físico-químicas del suelo.

La tradición de reciclar estiércol en la horticultura de vegetales ha sido causa de enfermedades, debidas, fundamentalmente, a que E. coli tipo O157:H7, el organismo patógeno, puede sobrevivir más de los 60 días, que es lapso más frecuente para el compostado. Se trata de una bacteria que vive en el intestino de animales entre los que figura el ganado vacuno, las ovejas, los ciervos y las cabras. También la portan animales domésticos y aves salvajes. Normalmente, ser portador de la bacteria no provocará en el animal ningún daño ni enfermedad. No obstante, en seres humanos, las toxinas que produce pueden causar enfermedades que van desde una diarrea a insuficiencia renal. En algunos casos, la enfermedad puede resultar mortal.

La cepa de E. coli O157 no es frecuentemente encontrada en estiércoles bien compostados pero, sin embargo, unos pocos microorganismos bastan para que se produzca una infección en humanos. La misma puede derivarse del contacto con excrementos de los animales, y el contacto posterior de las manos o los dedos con la boca, o de la ingestión de alimentos sin lavarse las manos previamente. Es fundamental que todo aquel que trabaje con animales o sus estiércoles, se lave las manos y los brazos concienzudamente antes de comer, beber o fumar. La ropa de trabajo deberá dejarse en el lugar de trabajo para su limpieza, de modo que las familias de los trabajadores de las explotaciones agrícolas no

puedan contraer la enfermedad mediante el contacto con prendas sucias. Estos recaudos deben extremarse en el caso de lodos cloacales.

Otra enfermedad que puede ser contraída al utilizar estiércoles pobremente compostados es la criptosporidiosis. Esta enfermedad, provoca diarrea y dolor abdominal con síntomas similares a los de la gripe durante períodos de hasta seis semanas, especialmente entre los jóvenes y las personas de edad avanzada. Es causada por un protozoo denominado *Cryptosporidium parvum*. Lo portan terneros, corderos, ciervos y cabras, y puede transmitirse a humanos mediante el contacto con excrementos animales o el agua potable contaminada con éstos. Debe tenerse en cuenta que todo el ganado bovino, ovino, ciervos y cabras portan la E coli O157 y el criptosporidio.

También por el contacto con excrementos de animales de granja, se incrementa el riesgo de contraer Salmonela. La bacteria Salmonela provoca diarreas, fiebres y dolores abdominales en seres humanos. En ocasiones, el contacto con el microorganismo da lugar a enfermedades de mayor gravedad. Aunque suele pensarse que la infección por Salmonela se produce al ingerir alimentos contaminados, es frecuente que resulte del contacto con los excrementos de animales de granja. Los seres humanos resultan infectados cuando la Salmonela accede al intestino, normalmente cuando el sujeto coloca las manos contaminadas con excrementos dentro o cerca de la boca, por ejemplo, al comer, beber o fumar. El contacto entre manos constituye asimismo una importante fuente de infección.

Es de suma importancia recordar que el contacto de los productos con las fuentes de infección resulta en un riesgo para los consumidores. Especialmente en las verduras de hoja debido a su estructura y a la cercanía de las partes consumibles con el suelo.

Por otra parte, existen varios tipos de tratamiento de los estiércoles para reducir el riesgo de contaminación microbiológica en frutas y hortalizas, entre los que se encuentran:

- Tratamientos pasivos (envejecimiento de estiércoles, influencia del clima, etc.)
- Tratamientos activos como la pasteurización, el secado por calor, digestión anaeróbica y aeróbica, estabilización alcalina o una combinación de estas

También deben adoptarse prácticas de manejo en el establecimiento que mantengan alejadas las fuentes de infección de las zonas de producción:

- Los lugares de almacenamiento y de tratamiento de estiércol deberán ubicarse tan lejos como sea posible de las áreas de producción y manejo del producto fresco
- Deben considerarse barreras o contenedores físicos para asegurar que en las áreas de almacenamiento o tratamiento de estiércoles no haya escapes y fugas por agua o viento que ocasionen contaminación
- Deben evitarse los escurrimientos provenientes de las áreas de almacenamiento o tratamiento del estiércol, que puedan contaminar el producto;
- Deben considerarse prácticas que minimicen el potencial de contaminación del estiércol tratado por aves o roedores

El uso de estiércoles no tratados en los campos de cultivo tiene mayor riesgo de contaminar que el uso de estiércoles tratados. Los productores que utilicen estiércoles no tratados deberán tener presentes las siguientes consejos de manejo:

- Considerar la incorporación de estiércol al suelo antes de la época de siembra
- No es recomendada la aplicación de estiércoles no tratados a los campos de cultivo durante la temporada de siembra y cultivo
- Maximizar el tiempo entre la aplicación del estiércol y la cosecha
- Donde no sea posible maximizar el tiempo entre la aplicación y la cosecha (como en los cultivos de frutas y hortalizas que son cosechados durante todo el año), el estiércol sin procesar no se debe utilizar.

Debido a que algunos de los patógenos sobreviven a los tratamientos activos, los agricultores deben tener en cuenta algunas recomendaciones similares a las del estiércol sin tratar, como maximizar el tiempo entre la aplicación y la cosecha. Además, pueden seguir las siguientes recomendaciones para el manejo y aplicación del estiércol tratado:

- Deberá tenerse cuidado de evitar la contaminación de frutas y hortalizas frescas con estiércol en proceso de compostado o que reciba otro tratamiento;
- Asegure que todos los materiales reciban un tratamiento adecuado tales como voltear las pilas de composta, evitar el sobremojado
- Los productores que compren estiércol deberán obtener una hoja de especificaciones de su proveedor acerca del método de tratamiento que éste utilizó para el estiércol de cada envío
- Los productores deberán contactar con expertos estatales o locales en manejo de estiércol para que les asesore específicamente en sus operaciones particulares y/o regionales

La materia fecal de los animales domésticos de los propios establecimientos es una fuente importante de patógenos en los alimentos. Por lo que se recomienda observar lo siguiente para minimizar los riesgos de contaminación:

- Los animales domésticos deberán ser excluidos de los campos de frutas y hortalizas frescas, viñedos, y huertas durante las temporadas de cultivo
- Donde sea necesario, los productores deberán considerar medidas que aseguren que los desechos o estiércoles de animales procedente de los campos adyacentes o instalaciones de almacenamiento, no contaminen las áreas de producción de frutas y hortalizas

La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación, a través de la Resolución 71199 – 12/02/99 establece la Guía de Buenas Prácticas Agrícolas para la Producción Primaria (cultivo-cosecha), Empacado, Almacenamiento y Transporte de Hortalizas Frescas que en su sección 1,3.5. Abonos, especifica:
- Los abonos orgánicos, incluyendo los originados a partir de lodos orgánicos y los residuos orgánicos urbanos, deben someterse a tratamientos (compostado u otros) para eliminar los agentes patógenos antes de ser incorporados al suelo. En caso contrario se podría contaminar el producto o bien el medio que lo rodea
- Aplicar los abonos con suficiente antelación al momento de cosecha, respetando los períodos de carencia, para evitar cualquier posibilidad de contaminación del producto
- Se prohíbe la utilización de lodos cloacales y residuos urbanos orgánicos como enmiendas (corrector de suelos) que no hayan sido compostados previamente de acuerdo a las normas vigentes (Las normas Eurep Gap ya prohíben el uso de lodos cloacales tratados y sin tratar). Tener en cuenta que la restricción de uso de estas enmiendas orgánicas determina que no se aplicarán durante el ciclo del cultivo hortícola. En el caso de aquellos cultivos en los que la parte comestible está en contacto con el suelo deben ser aplicados con una anticipación de SEIS (6) meses a la cosecha

Contaminación de acuíferos

La importancia del agua radica no solo en el aspecto productivo sino fundamentalmente como recurso natural susceptible de no ser renovado y vital para todos los seres vivos. Por ello cualquier elemento productivo que afecte el agua potable o las aguas superficiales (arroyos, ríos, lagos) debe ser considerado de modo especialmente crítico.

Todos los suelos realizan aportes de nutrientes a las napas y cursos de agua, principalmente bajo altos regímenes de precipitaciones. La magnitud de dicho aportes, se ve incrementada al encontrarse en el suelo formas solubles de los nutrientes utilizados en la fertilización.

El mejor ejemplo de ello, es el nitrógeno. La existencia de N en forma de nitrato genera las condiciones ideales, junto con el riego o las precipitaciones elevadas, para que el mismo se lixivie, en primer lugar, hacia las napas subterráneas y en un segundo paso, hacia los cursos de agua de la región.

Está demostrado que la producción agrícola participa activamente de la contaminación nitrogenada de napas y la *eutrofización* de aguas superficiales (Adiscott, 1995). Cuando se efectúan sobrefertilizaciones nitrogenadas, el N no aprovechado por el cultivo se acumula en el perfil y queda disponible para ser transportado por el agua percolante, de esta manera, se acumula el N en forma de nitratos (NO_3^-) en las napas. Una vez allí, los mismos pueden ser arrastrados hacia cursos de agua y eventualmente acumularse en lagos y lagunas donde generan un crecimiento descontrolado de la población de algas, consumiendo el oxígeno del agua y limitando las posibilidades de desarrollo de otras formas de vida, ocasionando, por ejemplo, mortandad de peces.

Otro destino probable del acuífero es el consumo del agua por parte de animales o incluso el hombre. Una acumulación de NO_3^- mayor a de 45mg/L hace que el agua deje de ser apta para consumo humano, pudiendo provocar la patología conocida como metahemoglobinemia. La misma produce acumulación de metahemoglobina en la sangre reduciendo la capacidad de transportar el oxígeno a todo el organismo. En poblaciones sanas, el nivel de metahemoglobina en sangre no supera el 2%. Se han registrado casos de pequeños con niveles de entre 5 y 50 % a partir de ser alimentados con leche en polvo con agua con niveles de 75mg/L. Los valores cercanos al 50% de metahemoglobina en sangre causan la muerte de los individuos. Esta afección se denomina "síndrome del niño azul" por el color característico que toman los labios y las mucosas de los más pequeños.

Los problemas asociados a la contaminación con NO3- de un acuífero, están referidos a la vulnerabilidad específica del mismo, es decir, la probabilidad que tiene un acuífero de ser contaminado por las prácticas humanas. Este concepto tiene en cuenta no solo las propiedades del medio (tipo de acuífero y cobertura, permeabilidad, profundidad, recarga, etc.) sino también los riesgos potenciales a los que está expuesto por las actividades que se desarrollan en la región y los posibles agentes contaminantes.

Un ejemplo de lo anterior se esquematiza en la figura siguiente en donde el bombeo genera una caída del potencial en el acuífero confinado permitiendo la recarga a través del acuífero libre en zonas con riesgo de contaminación.

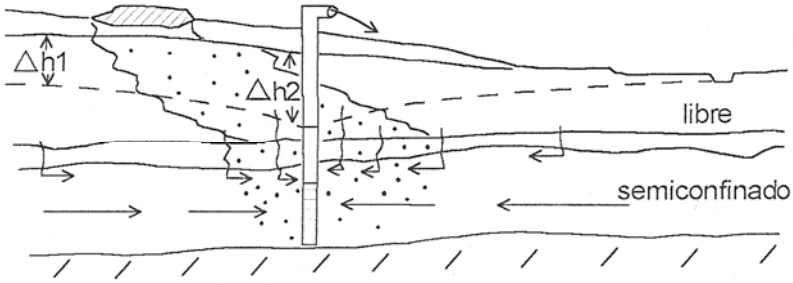


Figura 30. Contaminación por bombeo de un acuífero semiconfinado
Fuente Auge M., 2003.

Ya ubicados específicamente en la región de La Plata, es importante mencionar que su ejido urbano alberga 210.000 habitantes, que aumentan a unos 600.000 si se consideran las localidades de Tolosa, Ringuelet, Gonnet, City Bell, Villa Elisa y las ciudades de Berisso y Ensenada. En las zonas periféricas, existe un cinturón verde que produce hortalizas y flores, rodeando a la ciudad, el que emplea un volumen importante de agua para regar.

PROBLEMÁTICAS DE ÍNDOLE FÍSICA EN LOS SUELOS

Dr. Daniel Jorajuría, MSc. Jorge Claverie, Ing. Agr. Antonino Terminiello

Figura 31. Trasplantadora de lechuga

En la horticultura se hace un uso intensivo de la tierra, como resultado de la predominancia de ciclos cortos en sus cultivos. Por otro lado, la mecanización de las tareas es un avance tecnológico alcanzado y con tal difusión, que ya resulta difícil concebir un sistema productivo hortícola sin la inclusión del tractor y sus respectivos equipos para laboreo del suelo, siembra, protección de cultivos y eventualmente cosecha (Figuras 32 a 34)

Figura 32. Roturación del suelo con fresadora y rolo

Esto significa un importante tráfico anual. La cantidad de tránsito anual sobre un suelo productivo, puede expresarse en términos de Intensidad de Tráfico (IT). Este parámetro tiene unidades complejas, la más usual es expresar la IT como: t x km /ha. Es decir: la masa del tractor más la máquina que lleve, multiplicada por la distancia lineal (km) que debe recorrer dentro del cuadro trabajado, para hacer una hectárea del trabajo que corresponda.

Figura 33. Preparación de camellones

La intensidad de tráfico sobre un terreno de uso hortícola, puede estar en el orden de 220 a 250 ton km/ha, cifra significativamente superior a la requerida por otros cultivos tales como forrajeras o cereales. En este caso la alta intensidad está abonada por una alta frecuencia anual en el pasaje, es decir muchos kilómetros sobre la misma hectárea, más que por la masa de los tractores, que nunca son de los más grandes.

Antecedentes

Evolución de los conocimientos

A partir de las últimas tres ó cuatro décadas se ha dejado de lado el concepto del suelo como elemento singular y se ha consolidado la idea del suelo como sistema complejo conformado por factores bióticos y abióticos, que deben necesariamente caracterizarse a partir de la suma de propiedades y no desde estudios ú ópticas parciales.

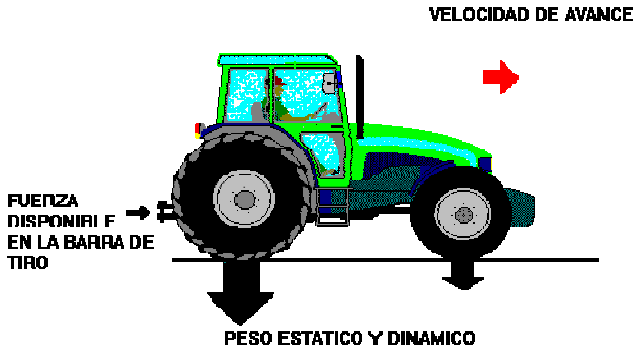
Conjuntamente se ha reconocido que las clasificaciones tradicionales que dividían el objeto de estudio en física, química y biología, son en verdad disciplinas con límites arbitrarios y no unívocamente definibles. Existen propuestas de clasificaciones que incluyen por ejemplo las propiedades físicas, físico-químicas, bioquímicas, biofísicas, y eventualmente otras.

Sin embargo no todas estas disciplinas fueron desarrollándose conjuntamente y en igual magnitud. Las problemáticas relacionadas a la química ó a la biología, fueron estudiadas con anterioridad a las demás. Particularmente la física del terreno agrícola fue considerada como tópico significativo de estudio en la comunidad científica, muchos años después, aún cuando las propiedades físicas determinan la mayoría de los fenómenos biológicos.

Durante la segunda guerra mundial, y fundamentalmente para resolver problemas de tránsito de vehículos militares, nació una disciplina denominada "*Locomoción Extraviaria*", cuyo objetivo fundamental fue predecir la capacidad de paso de un vehículo con parámetros conocidos y fácilmente cuantificables, que debía desplazarse sobre un suelo casi desconocido. Años más tarde, su universo de estudio se amplió al campo de la ingeniería agrícola . Allí se suma a la problemática del tránsito sobre suelos deformables, la necesidad de maximizar el rendimiento tractivo de los conjuntos que sobre él se desplazan. El rendimiento de tracción (η_T) relaciona la potencia tractiva útil con la disponible en el motor.

$$\eta_T = \frac{Nb}{Nm} \qquad Nb = \frac{T\ Vreal}{Nm}$$

Donde: Nb = Potencia tractiva útil
Nm = Potencia en el motor
T = Fuerza en la barra de tiro
Vreal = velocidad de avance real



Pero el problema es que las características del suelo que aportan a una buena traficabilidad, en general son exactamente las opuestas a las que contribuyen a una fertilidad integral o capacidad productiva. La condición de suelo buena como camino no sirve para producir vegetales. Alrededor de esta paradoja es que debemos buscar una solución de compromiso entre eficiencia en trabajos de tracción, es decir aquellos que implican desplazamiento horizontal sobre el terreno, y tratamiento mecánico del suelo, que haga sustentable la intensidad de tráfico que deben recibir anualmente.

El desarrollo del estudio del tráfico agrícola y su impacto sobre la producción continua, coincide con la mecanización total y generalizada de la producción agropecuaria y se ve favorecido cuando se incrementa significativamente la masa de los tractores y por ende la magnitud de las cargas normales y tangenciales que pretenden aplicarse sobre el suelo, así como la frecuencia del tránsito, realmente elevada en los sistemas productivos hortícolas. También incidió, la toma de conciencia colectiva, por fuera de la comunidad científica, de la externalidad de los procesos productivos, los cuales pueden generar consecuencias ambientales indeseables y perdurables en el tiempo.

Si bien el incremento de las masas de los tractores en la producción hortícola, en relación a otras explotaciones agrícolas, puede considerarse como de menor magnitud, el número de pasajes de los conjuntos tractor-implementos puede ser la causa más importante de la aparición de la compactación del suelo. Diversos autores enuncian que el pasaje repetido de vehículos más livianos que se trasladan repetidamente sobre la misma huella o surco, tendría un efecto similar en cuanto a las modificaciones de las propiedades físicas del suelo, por debajo de la profundidad de labor.

Puede considerarse que diez pasadas puede constituirse como el número crítico de rodadas a partir del cual se pierden las ventajas de transitar con un tractor liviano como alternativa a uno pesado con menos pasadas.

A su vez, la explotación hortícola tiene la característica de que se suceden cultivos distintos en parcelas apareadas de dimensiones que no solamente suelen ser estrechas sino también, de superficies que se mantienen cultivo tras cultivo por tratarse de producciones de distintos momentos de cosecha.

Como resultado de los repetidos pasajes sobre el terreno, el suelo se compacta rápidamente cuando la estructura del mismo es debilitada por la labranza o la excesiva humedad. La labranza destruye la estructura, y el tráfico subsiguiente rápidamente

recompacta el suelo, incluso a valores superiores a los niveles de compactación anteriores al laboreo mecánico. El primer pasaje, de los repetidos que se hacen sobre la misma senda luego de la labranza, es el más crítico por tomar al suelo en una situación de altísima compactabilidad.

La situación enunciada en el párrafo anterior es la que se encuentra normalmente en la mayoría de los cultivos hortícolas, donde la intensidad de su producción implica el pasaje de varios implementos, ya sea de labranza, de tratamiento mecánico de malezas o de repetidos pasajes de aplicaciones fitosanitarias, apuntados a obtener un producto de calidad comercial apropiada a las exigencias de los distintos mercados. Todo esto se da en un lapso de tiempo que a menudo es muy corto y en condiciones de humedad del terreno francamente desfavorables para su tránsito.

Problemas tales como la pérdida de productividad de muchas regiones cultivables, la erosión de inmensas regiones del planeta, la contaminación química de las napas freáticas, la salinización y la compactación de los suelos, presionaron a la comunidad científica internacional para la búsqueda de soluciones y la generación de los límites necesarios que racionalicen la producción de alimentos sin comprometer el que debe ser recurso de futuras generaciones.

El problema de la compactación de los suelos es quizás la temática que más desarrollo ha tenido en la última década, demostrándose una vez más, que una vez instalado un problema, y desatendido por mucho tiempo, que es siempre complejo y la mayoría de las veces con consecuencias negativas sobre otros aspectos colaterales, la solución es desde el punto de vista ingenieril, muy difícil, y desde la óptica económica, prácticamente inviable.

Compactación de los suelos bajo tráfico

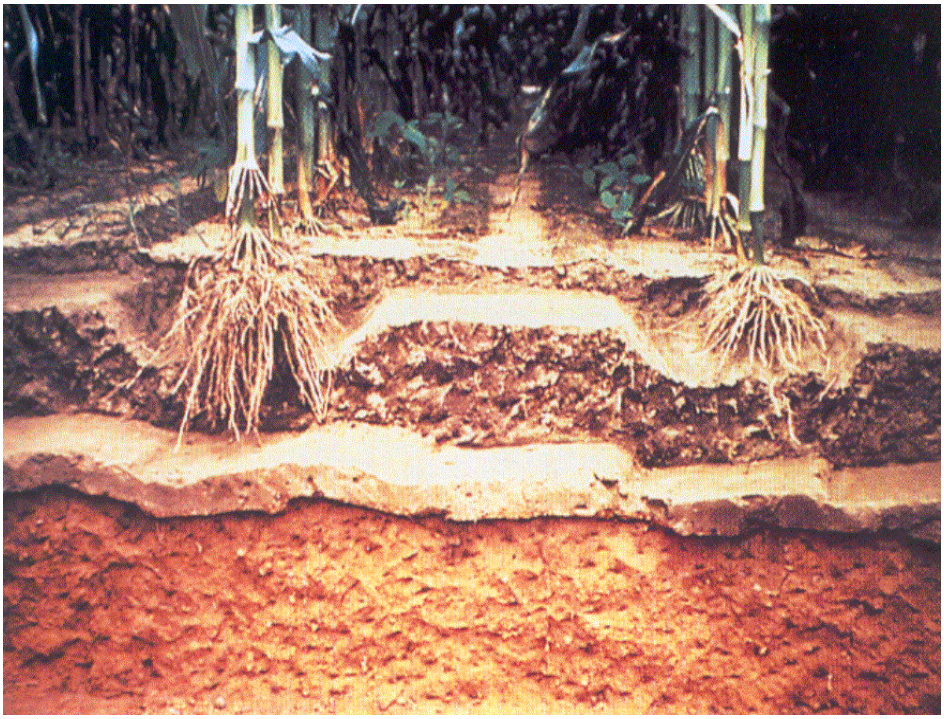


Figura 34. Desarrollo radicular en cultivo de maíz afectado por capas compactadas

Figura 35. Cultivo frutal con tránsito repetido por la misma senda

EL imperativo de incremento de la productividad implica:

- El aumento en el tamaño de las explotaciones
- El incremento en la potencia y tamaño de los tractores, pulverizadoras, sembradoras, fertilizadoras y carros para transporte de lo cosechado.
- El incremento de las zonas agrícolas y la reducción de los períodos de rotación y descanso.
- Pampa húmeda 3,7 de 4,9 millones de has (Argiudoles).
- Pampa arenosa 1,1 de 8 millones de has (Hapludoles).
- Los suelos de llanura correspondientes a la fosa tectónica pampeana, con una evolución sobre pastizales, implica abundante presencia de limo, que tiende a la masificación del suelo.
- Mayor susceptibilidad a la degradación de las condiciones físicas.

Compactación: Proceso inducido por el tráfico vehicular principalmente. Se dice que un suelo está compactado cuando ha roto el equilibrio entre las unidades estructurales, la estabilidad de las mismas, los poros, las grietas y las fisuras (Fig 29). Esa rotura del equilibrio en el perfil no permite asegurar un rápido drenaje, ni una adecuada aireación, ni tampoco un contenido de humedad suficiente para garantizar el crecimiento de los cultivos. En los procesos de compactación por tráfico se desequilibra la matriz porosa del suelo, incrementándose la proporción de microporos a expensas de la destrucción de los macro y mesoporos (Tabla 50)

Tabla 50. Clasificación de poros del suelo y su función

TIPO	TAMAÑO (micras)	TENSIÓN (atm)	FUNCIÓN
Macroporos	> 60	0.05	Aireación; Infiltración; Conductividad Saturada
Mesoporos	60 – 10	0.05 -- 0.33	Conducción lenta
Microporos	10 – 0,2	0.33 – 15	Almacenaje
Microporos	< 0,2	< 15	Agua no disponible

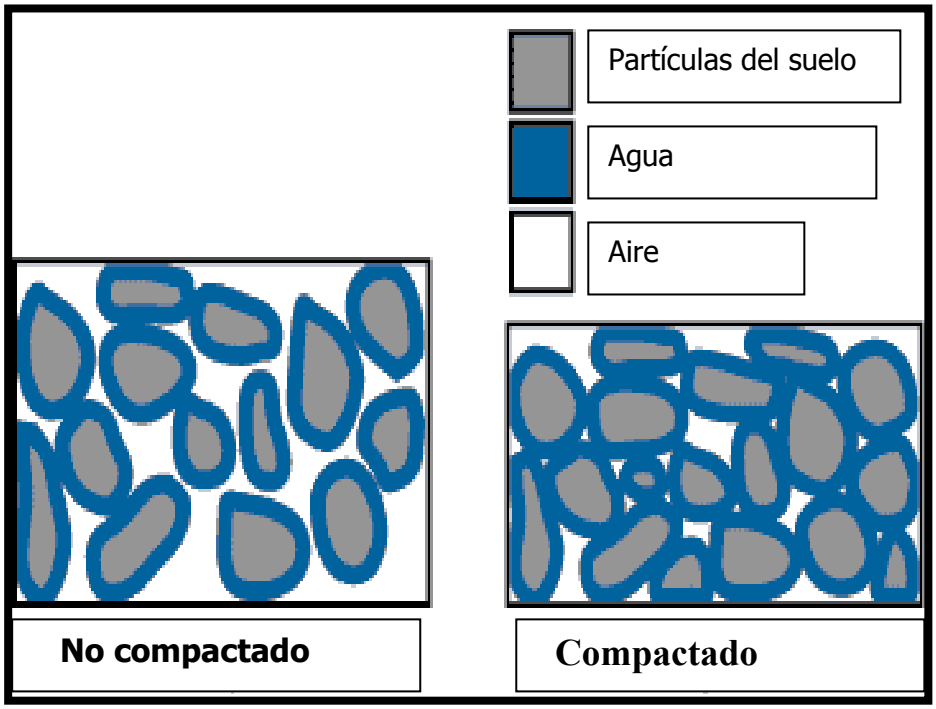
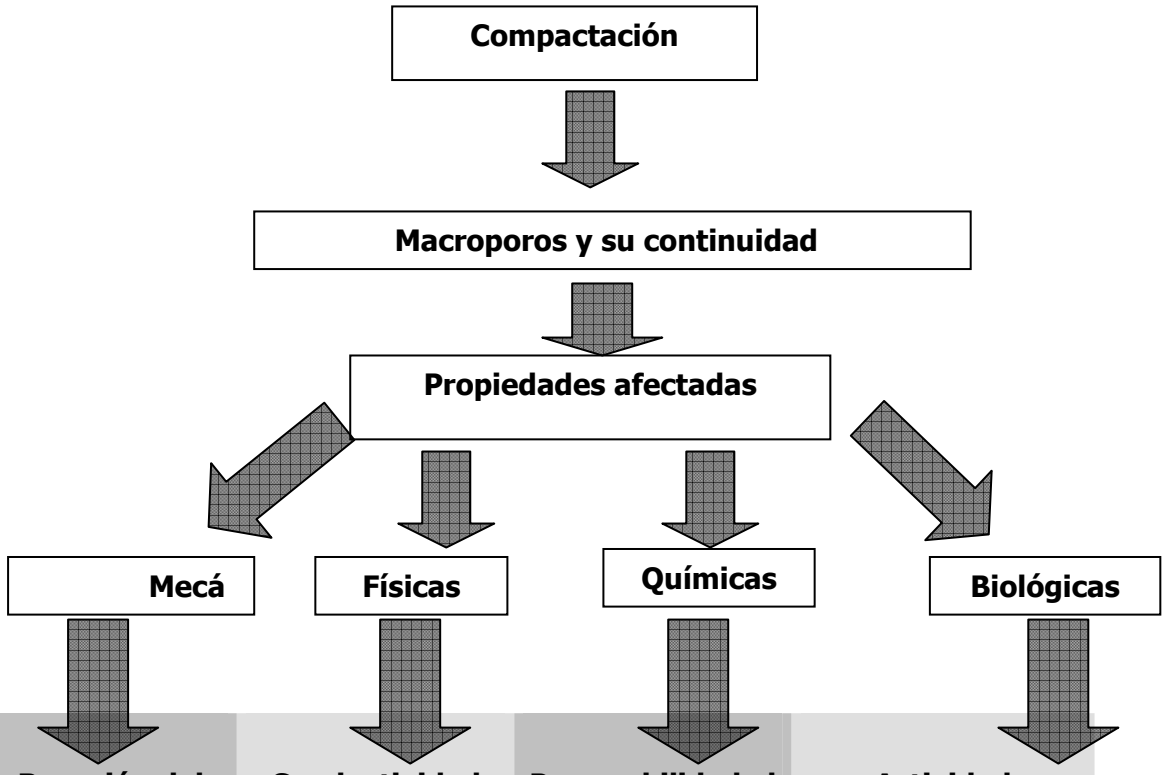


Figura 36 Esquema de proceso de compactación

Afectación de la compactación del suelo a la productividad hortícola



Reacción del suelo:	Conductividad Hidráulica	Permeabilidad al aire	Actividad Microbiana, Fauna y Raíces
Esfuerzo de Tracción	Capacidad de Almacenamiento	Mineralización del N_2	Nodulación Lombrices
Costos Energéticos	Infiltración Traficabilidad	Potencial Redox	Crecimiento Raíces Absorción Iónica
Contaminantes Atmosféricos	Oportunidad labor Encharcamiento	Disponibilidad Iónica	Pérdidas de Nutrientes
Penetración Radicular	Costo drenaje Erosión, pérdida nutrientes	Desnitrificación N_2 N_2O	Ciclos de Seca/Humedad
Respuesta del Cultivo	**Respuesta del Cultivo**	**Respuesta del Cultivo**	**Respuesta del cultivo**

Figura 37. Propiedades afectadas por la compactación

Parámetros utilizados para la cuantificación de la compactación

Resistencia a la penetración

El dato que más utilizado para estimar el estado mecánico del suelo, es la resistencia a la penetración. Indica la presión necesaria para penetrar un suelo y puede obtenerse con un penetrómetro de cono (Figura 38), dispositivo de fácil operación, que permite hacer muchas determinaciones en poco tiempo, lo cual posibilita compensar la muy alta variabilidad del dato y permite relevar datos hasta profundidades importantes.

Figura 38. Penetrómetro de cono

Hay muchos factores que tienen incidencia en los valores de resistencia a la penetración obtenidos y quizás el más relevante sea el porcentaje de humedad presente en el suelo, por lo tanto para poder comparar datos es importante expresar la humedad presente al momento de la determinación de la resistencia a la penetración.

Las especies vegetales tienen diferentes capacidades para penetrar el suelo con alta resistencia mecánica y hay trabajos que demuestran que las leguminosas son más eficientes en estabilizar la estructura del suelo que las no leguminosas. Si bien hay mejoras genéticas en algunas especies que permiten el desarrollo radicular en suelos con capas endurecidas, las prácticas de manejo, el uso de maquinaria pesada y el sistema de rotación de cultivos, tienen una incidencia muy significativa en la alteración de las propiedades físicas y morfológicas de los suelos.

Como datos indicadores de las posibilidades de exploración de las raíces, valores cercanos a 1 MPa aparecen como potenciales limitantes del crecimiento satisfactorio, mientras que cercanos a 2 MPa pueden ser un verdadero freno al desarrollo radicular. Alta resistencia a la penetración también reduce la emergencia de las plántulas. Se han encontrado reducciones importantes en la emergencia de trigo con valores de RP algo superiores a 1,2 MPa.

Como ya se ha dicho, óptimas condiciones para el tráfico de las máquinas no son las mejores para garantizar el mejor desarrollo de los cultivos. A modo de resumen, en la Tabla 51 se dan valores orientativos de RP en diferentes condiciones de suelo y sus implicancias.

Tabla 51. Clases de suelo en relación valores de resistencia a la penetración

Clase de suelo	RP(kPa)	Condiciones mecánicas
0	> 2000	Sin huellas visibles. Pastura vieja muy seca. *Posible detención del desarrollo radicular*
I	900 - 1800	Sin problemas de tracción. Rastrojo seco del año anterior. *Limitaciones para el óptimo desarrollo radicular*
II	450 - 900	Condiciones pobres de tracción. Rastrojo blando o tierra consolidada suelta
III	200 - 450	Marginal para el tránsito, huellas muy profundas. Suelo recién labrado.

La compactación puede alterar el desarrollo radicular al incrementar la impedancia mecánica, alterar el volumen y la configuración del espacio poroso o por crear ambientes de humedades propicias para el desarrollo de enfermedades. En cuanto a disminuciones de rendimiento, en Los Hornos se han encontrado mermas de rendimiento de materia seca de una pastura cercanos al 30% en zonas cercanas a las huellas del tractor.

El incremento en la impedancia mecánica del suelo también acarrea alteraciones en el normal crecimiento de diferentes cultivos hortícolas, tanto en la parte aérea como en la subterránea de los mismos originando, a menudo, malformaciones que, en el caso de tubérculos o raíces son muy importantes ya que éstas son las partes del vegetal que tienen valor comercial. Stranberg y White (1979) concluyen sobre el efecto negativo de la compactación en el normal desarrollo de las raíces de zanahoria (*Daucus carota*, L.), citando alteraciones en el peso maduro de las mismas y en el diámetro, provocando también un excesivo engrosado y ahusado, y un incremento en la deformación por "branching" (bifurcación) de las mismas (Figura 40). Los citados autores concluyen que, con el incremento de la compactación se manifiesta una reducción en el largo de las raíces. Todo lo expuesto redunda en un deterioro de la calidad comercial del producto producido. Cary (1985), reportó considerables reducciones en el rendimiento de los tubérculos de papa (*Solanum tuberosum*) cuando el sustrato era transitado durante las distintas labores culturales (Figura 39).

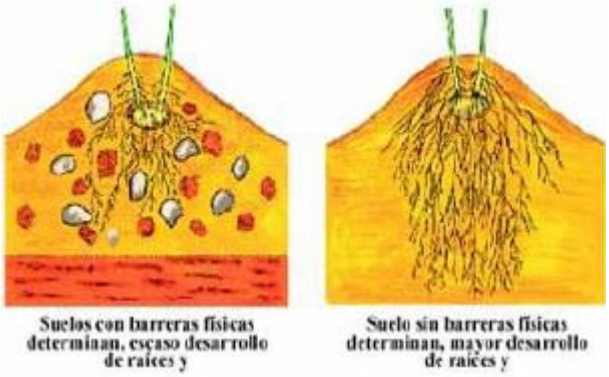


Figura 39. Alteraciones en el crecimiento de la raíz de papa

Figura 40. Malformaciones en la raíz de la zanahoria

Terminiello *et al* (2000 a) en un ensayo realizado en una explotación hortícola del Paraje "El Peligro" en el Partido de La Plata citan reducciones en el rendimiento del cultivo de repollo (*Brassica olerácea* L. grupo capitata) de transplante, para los tratamientos que recibieron mayor número de pasadas de implementos. En dicho ensayo se identificaron surcos sobre las parcelas del cultivo con diferente tráfico, desde el momento de finalización de la preparación del terreno y hasta el momento de cosecha. En la Tabla 52 se consignan los valores alcanzados para cada situación en relación al peso seco y fresco.

Tabla 52. Valores de biomasa aérea y materia seca de repollo para cada tratamiento de tránsito

Tratamientos	**Peso seco ($g.pl^{-1}$)**	**Peso fresco ($g.pl^{-1}$)**
Surco menos pasadas	163.6 a	1902.6 a
Surco más pasadas	130.5 b	1447.9 b

Valores seguidos de igual letra consignan diferencias no significativas (P< 0,05) de acuerdo al test de Tukey

Stone (1988), en un experimento de dos años, determinó la influencia de la resistencia a la penetración y de la densidad aparente sobre el rendimiento de cuatro cultivos hortícolas: haba (*Vicia faba*), repollo (*Brassica oleracea* var*. capitata*), puerro (*Allium porrum*) y remolacha azucarera (*Beta vulgaris* var. *sculentum*). Se efectuaron tres tratamientos: suelo testigo, suelo transitado y compactado y suelo descompactado encontrando que el rendimiento en peso fresco se incrementó en el suelo descompactado (comparado con el testigo) en 26, 28, 18 y 3% para haba, repollo, puerro y remolacha respectivamente, durante 1978. En 1979, se registraron incrementos de 39, 25, 16 y 21%, para los mismos cultivos. En el suelo transitado (comparado con el testigo) se determinaron disminuciones de rendimiento de 29, 40, 26 y 22% en 1978 y de 35, 12, 36 y 34% en 1979, respectivamente para cada cultivo citado. Como puede apreciarse, mientras que la compactación del suelo disminuyó el rendimiento de los 4 cultivos, la descompactación lo incrementó. El mismo autor también encontró una correlación negativa entre la producción de materia seca y la resistencia del suelo a capacidad de campo. La disminución de materia seca fue de aproximadamente $1Mg.ha^{-1}$ por cada incremento de 0,5MPa en la resistencia a la

penetración en el rango estudiado (0,5 a 2,5MPa), mientras que no hubo correlación entre la densidad aparente y la producción de materia seca.

En relación al análisis precedente, Terminiello *et al* (2000) encontraron diferencias (considerando rendimientos potenciales absolutos) en peso fresco en repollo de, aproximadamente, 15 $Mg.ha^{-1}$ para incrementos de resistencia a la penetración de 0,4 MPa entre los tratamientos, para la densidad de plantación utilizada en el ensayo.

Por otro lado, Smittle y Williamson (1977) efectuaron un ensayo cuantificando el efecto de la compactación del suelo sobre el nitrógeno, la eficiencia en el uso de agua, el crecimiento radicular, el rendimiento y la forma del fruto de un cultivo de pepino. Los tratamientos de compactación se efectuaron por medio de pasajes de un tractor de 2,1Mg de masa total. Los autores determinaron que el crecimiento radicular fue inhibido en un 80% con resistencias a la penetración de 0,85 MPa, ocasionando entre un 25 y 35% de reducción del rendimiento.

Densidad aparente

En el suelo, como en cualquier otro cuerpo físico, la densidad se define como la relación entre una masa y el volumen que ella ocupa

Ahora bien, dado el carácter poroso del suelo, conviene distinguir entre la densidad

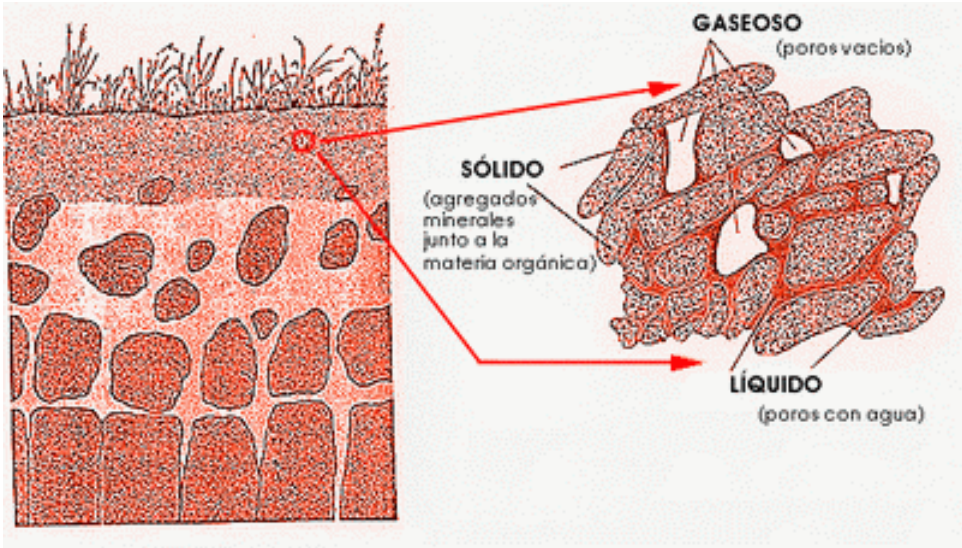


Figura 41. Esquema de los componentes del suelo.

de sus componentes sólidos y la del conjunto del suelo, incluyendo los poros, por ello se definen dos tipos de densidad.

Densidad real

Se designa de esta forma a la densidad de la fase sólida. Es un valor muy estable, pues la mayor parte de los minerales arcillosos presentan una densidad que está alrededor de 2.65 gramos por centímetro cúbico. Muy semejante es la de los minerales más abundantes en las arenas, como cuarzo, feldespatos, etc. Los carbonatos presentan una densidad algo menor así como la materia orgánica, que puede llegar a valores de 0.1.

Densidad aparente

Refleja la masa de una unidad de volumen de suelo seco y no perturbado, que incluye tanto la fase sólida como a la gaseosa englobada en ella. Para establecerla, debe tomarse un volumen suficiente para que la heterogeneidad del suelo quede suficientemente representada y su efecto atenuado.

El término compactación puede definirse como la compresión de una masa de suelo en un volumen menor, o la disminución del volumen del suelo a expensas de su espacio poroso (Taboada, 2002). Es, entonces, el aumento en la densidad como resultado de cargas o presiones aplicadas (Raghavan *et al.* 1990).

La textura, la estructura y la estabilidad estructural, determinan diferentes modelos de unión entre partículas los cuales implican distintos sistemas porosos con características particulares en cuanto a su volumen total, tamaño, distribución, forma, longitud, continuidad y estabilidad. También es variable la capacidad de esos sistemas para recibir, transmitir y retener agua y permitir un adecuado balance agua-aire que facilite un normal desarrollo de los cultivos (Andreu Soler 1996).

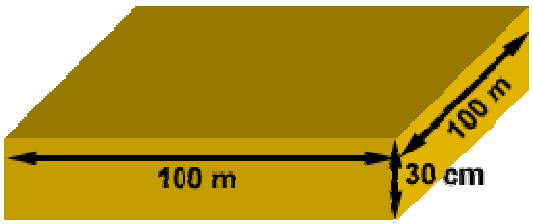
Si se entiende la compactación como la compresión de suelos con el consiguiente aumento de la densidad y, simultáneamente, una reducción del volumen de aire; surge que es una modificación de la estructura, producto de la cual se alteran los procesos físicos, químicos y biológicos que conducen a la modificación de los ciclos biológicos de interés para la producción agropecuaria y forestal.

A diferencia de la consolidación, que es el incremento de la densidad aparente producido por agentes naturales tales como la fuerza de gravedad o las precipitaciones, la compactación es el resultado de tensiones generadas por el peso de los vehículos que transitan sobre el suelo, las vibraciones originadas y el patinamiento activo de las ruedas motrices (Adebiyi *et al*, 1991). La compactación se refiere al proceso que sufren los suelos no saturados cuando son comprimidos por cargas aplicadas durante un corto período de tiempo, sin expulsión de agua (Marshall y Holmes 1988, citados por Alakukku 1997, Gupta *et al.* 1989).

Suele hacerse referencia a un efecto de "empaquetamiento" del suelo producido por una fuerza mecánica, que origina una disminución del volumen ocupado por los poros, e incrementa la densidad y la resistencia de la masa del suelo. Hay menos poros de gran tamaño con lo cual se afecta la tasa de infiltración, el drenaje y el intercambio gaseoso, haciéndolo más lento, generando problemas relacionados con la menor aireación. Por otra parte. el incremento de la resistencia mecánica hace que las raíces deban ejercer mayor fuerza para penetrar el suelo (Swan *et al.* 1987).

La densidad es muy variable según el suelo, incluso en cada uno de los horizontes porque depende del volumen de los poros. Su valor en los horizontes A suele estar comprendido entre 1 y 1.25, mientras que en los horizonte B puede alcanzar hasta 1.5 o más alto. Su valor permite establecer equivalencias entre las relaciones masa/masa, habituales en la medición de los parámetros del suelo, y las masa/superficie que son las utilizadas en la aplicación de enmiendas al mismo, para corregir sus deficiencias.

Si se desea adicionar un determinado porcentaje de un elemento establecido, debe conocerse la masa de suelo que corresponde a una superficie definida para un espesor concreto. Usualmente, se utiliza como unidad de superficie la hectárea y como profundidad la correspondiente a la capa arable que se establece como promedio en 30 cm (Fig 34). De este modo, la masa de una hectárea puede calcularse multiplicando la densidad aparente por su volumen, expresado por el producto del espesor deseado en metros multiplicado por 10.000 que es su superficie en metros cuadrados. En este caso, la densidad debería expresarse en Mg/m^3 y el resultado final quedaría en Mg/ha. Una vez conocido ese valor ya es posible aplicar cualquier relación masa/masa obtenida en la determinación del parámetro a corregir, sin más que adecuar convenientemente las unidades.



Masa de la capa arable de una hectárea:
Ca = 100m . 100m . 0.30m . da Mg/m³ = 3000 . da Mg

Figura 42. Cálculo de densidad

Determinación de la densidad aparente

Si bien para la densidad real pueden tomarse valores promedio sin que el error sea excesivamente significativo, la densidad aparente es importante medirla en cada caso por su mayor variabilidad.

Puede obtenerse por métodos directos e indirectos. Los primeros, cilindros de volumen conocido de diferente relación altura: diámetro, son sencillos pero muy laboriosos y susceptibles de introducir errores. Los segundos, sondas de radiación gamma, son costosos y su uso debe estar a cargo de personal especializado. También son laboriosos, lentos y exigen frecuentes calibraciones.

- **Métodos directos**

Método del cilindro: consiste en tomar un volumen fijo de suelo sin perturbar y pesarlo una vez seco, por calentamiento a 105º C hasta peso constante. Para ello se suele utilizar un cilindro metálico con un volumen conocido. (Fig 35). Una vez lleno y enrasado en ambos extremos, se extrae el suelo contenido, cuyo volumen corresponde con el del cilindro, se seca y se pesa. La densidad queda determinada por la relación entre el peso obtenido y el volumen correspondiente.

Figura 43. Determinación de densidad con cilindros

Método con parafina: El principal inconveniente de la metodología anterior radica en el perjuicio que ocasiona la presencia de piedras, por lo que en suelos pedregosos resulta

conveniente utilizar otro sistema, menos preciso pero más sencillo. Consiste en tomar un agregado del suelo, desecarlo y pesarlo para conocer su masa. Luego se sumerge en parafina fundida para impermeabilizar su superficie, y una vez solidificada ésta puede volver a pesarse. El agregado parafinado se introduce en una probeta graduada y llena de agua en la que se mide el incremento de volumen sufrido por el agua como consecuencia de la introducción del agregado, que corresponde con el volumen de éste. De esta forma conocemos los dos parámetros necesarios para el calculo de la densidad. Aunque la capa de parafina es muy tenue y su volumen despreciable, puede estimarse en función de su densidad y del incremento de peso sufrido por el agregado tras el proceso de impermeabilización.

- **Método indirecto**

Una técnica de evaluación muy común es la medición indirecta de la densidad aparente por atenuación de rayos gamma, utilizando una sonda nuclear, equipo que suele también hacer la evaluación de la humedad presente del perfil a través de la retrodispersión de neutrones emitida por la misma fuente radiactiva (Fig 36 y 37). Luego el propio equipo calcula la densidad aparente en seco. (Erbach, 1987). Una característica favorable es además, la mayor cantidad de datos que pueden adquirirse en similar período de tiempo respecto de otros métodos y la mínima disturbación que producen sobre el suelo a evaluar.

Constituye un parámetro que refleja de un modo indirecto el estado estructural y el grado de compactación de un suelo.

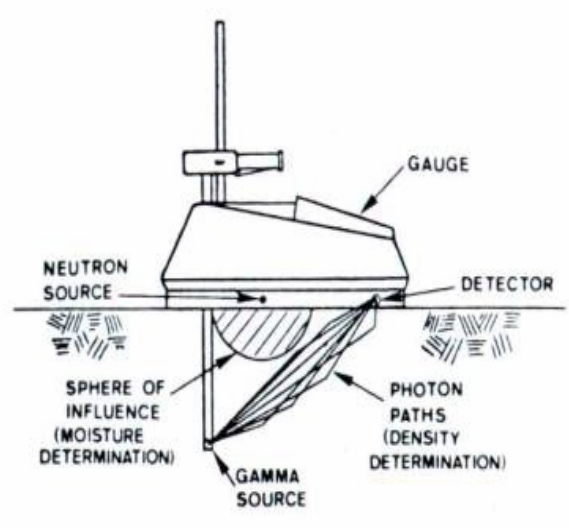


Figura 44. Sonda de neutrones

Figura 45. Determinación de densidad en profundidad

Diversos autores utilizan la medición de los valores de densidad del suelo como uno de los parámetros para caracterizar la restricción al crecimiento de raíces por *compactación*. Para cada suelo se han considerado valores críticos de densidad, a partir de los cuales surgen impedimentos para la penetración de raíces. Los valores críticos de densidad del suelo propuestos por Reinert *et al* (2001) son aproximadamente 1,45 Mg m^{-3} para suelos con horizonte de textura arcillosa (más de 55 % de arcilla), 1,55 Mg m^{-3} para suelos con horizonte de textura media (arcilla entre 20 y 55 %) y 1,65 Mg m^{-3} para suelos con textura arenosa (menos de 20 % de arcilla). Otras fuentes citan, para suelos limosos a franco limosos, 1.55 Mg m^{-3} (Logsdon *et al*, 2004). Otros autores encuentran que la densidad no debiera superar 1,05 Mg m^{-3} para permitir el máximo rendimiento.

En relación a los cultivos hortícolas, la bibliografía internacional cita valores de densidad aparente de 1,7 $Mg.m^{-3}$ como limitantes para el desarrollo radicular en tomates (*Lycopersicum sculentum)* y vid *Vitis vinifera*), disminuyendo la producción de fruta comercial. Sin embargo, otros autores determinaron que densidades de 1,53, 1,77 y 1,81 $Mg.m^{-3}$ no afectaron el rendimiento de maíz dulce (*Zea mays ssp. Sacharata*).

La afectación de esta propiedad física sobre los cultivos hortícolas dependerá del tipo de cultivo, de la profundidad y del estado fenológico del mismo al momento de la ocurrencia de los valores limitantes.

Esta divergencia en los resultados puede fundamentarse en la complejidad que evidencia el sistema de producción hortícola, donde conviven distintas alternativas productivas como cultivos de asiento y de transplante ya sea a campo o en diferentes ambientes controlados. Estas situaciones producirían la diversidad de alcances de los efectos de la compactación por tránsito.

Por otro lado, Smittle y Williamson (1977) estudiaron el efecto del incremento de la densidad del suelo como producto de la compactación mecánica sobre el rendimiento del pepino (*Cucumis sativus* L.). Los autores determinaron un decrecimiento del 38% del peso seco de las plantas. La disminución en el crecimiento radicular se reflejó en forma significativa en el rendimiento del cultivo de pepino, con una disminución del 39% (Tabla 53).

Tabla 53. Rendimiento y relación largo/diámetro del fruto de pepino

Tratamiento	**Rendimiento (Mg,ha^{-1})**	**Forma fruto (largo/diámetro)**
Compactado	12,2 b	2,22b
No compactado	20,1a	2,42a

Valores seguidos de igual letra consignan diferencias no significativas (P< 0,05) de acuerdo al test de Duncan

De todas, formas, la densidad aparente es un valor mucho menos sensible que la resistencia a la penetración para evaluar compactaciones inducidas por tráfico agrícola.

Efectos de la compactación sobre el flujo de agua , gases, disponibilidad del nitrógeno y emisión de NO_2 en la matriz del suelo

El suelo agrícola es un sustrato formado por tres fases: líquida, sólida y gaseosa, en una proporción aproximada del 50%, 25% y 25%, respectivamente.

Los cambios causados a la matriz de poros del suelo (incremento de la proporción de microporos en detrimento de poros mayores) por el efecto de la aplicación de fuerzas externas, pueden ocasionar, entre otros problemas, alteraciones en el transporte de líquidos y gases, volatilización de estos últimos junto con problemas en el transporte, inmovilización y extracción de nutrientes, como, por ejemplo en la mineralización o desmineralización del nitrógeno.

Los efectos de la compactación del suelo sobre el movimiento y redistribución del agua en el perfil son debidos principalmente a los cambios en sus propiedades hidráulicas e indirectamente por las influencias del estado de aireación y resistencia mecánica relacionados al crecimiento y alcance de las raíces.

La disminución en la disponibilidad de oxígeno puede acarrear, en casos extremos, asfixia a nivel celular, perdiendo funcionalidad las raíces y provocando decaimiento de las plantas.

En cuanto a la capacidad de infiltración de un suelo, además de la clase textural a la que pertenezca el mismo, el uso y el manejo cultural del lote son los factores que mayor influencia tienen sobre la tasa de infiltración.

Alakukku (1996), reporta reducciones significativas en la conductividad hidráulica producto de la compactación del suelo en la huella efectuada por los vehículos, en comparación con las de las áreas no disturbadas, lo cual fue asociado con un incremento de la densidad aparente y un decrecimiento de la macroporosidad.

Es ampliamente ilustrado en la literatura el efecto de la compactación del suelo y el encharcamiento sobre la disminución del ODR (Tasa de Difusión de Oxígeno), como la disminución de absorción de oxígeno por unidad de raíz en crecimiento en suelos compactados (Glinski y Lipiec, 1990; Stepniewski *et al*, 1994; Dexter y Czyz, 2000).

Distintos autores enuncian que, en ciertos casos, las alteraciones en el rendimiento y calidad de los productos hortícolas no se producirían por el efecto directo de la impedancia mecánica originada por el tránsito sino, por los efectos secundarios que de ella derivan. Es decir, la alteración de la matriz de poros del suelo traería condiciones de acumulación de humedad en el perfil, originando un ambiente de saturación y una disminución de la capacidad de intercambio gaseoso de ese suelo, que se traduciría, por ejemplo, en interrupciones del ciclo del nitrógeno, condiciones de hipoxia y un ambiente propicio para la proliferación de diversas enfermedades que obedecen a diferentes orígenes (fúngicas, bacteriales y virales). Esta situación predispondría también a la aparición de diversas plagas de insectos. Lo anteriormente expresado señala una clara diferencia entre el alcance de los efectos de la compactación en referencia a si se trata de cultivos conducidos al aire libre o en ambientes protegidos.

En relación a lo expresado, Wolfe *et al,* (1995) reportan como resultado de ensayos de tres años, disminuciones en el rendimiento de repollo (*Brassica oleracea* L. grupo capitata), maíz dulce (*Zea mays* L.), pepino (*Cucumis sativus* L.) y poroto (*Phaseolus vulgaris* L.). Los autores concluyeron que, en los cultivos que se realizaron a campo, períodos prolongados de anegamiento luego de eventos de lluvia, favorecieron la ocurrencia de daños por insectos y las deficiencias de nutrientes en las parcelas con tratamientos de compactación. Esto provocó declinaciones en el rendimiento en relación a las parcelas testigo. Los mismos autores enuncian que las variaciones de los parámetros evaluados difirieron en relación a los cultivos y también a la conducción de los mismos, es decir, si se

trató de cultivos a campo o bajo invernáculo. Los valores de disminución de rendimiento encontrados fueron, respectivamente, de 73%, 49 %, 41% y 34% para repollo, poroto, pepino y maíz dulce en la condición de siembra de asiento y, de 29 % para repollo de transplante.

Cox (1981) estudió la incidencia media de la enfermedad *Tip-burn* (Figura 46) en lechuga (*Lactuca sativa*,) encontrando que ésta se incrementó cuando el riego se aplicó fuera del surco debido, probablemente, a la compactación producida por la rueda del tractor al transitar el suelo. En la huella se produciría una reducción de la infiltración de agua, disminución del crecimiento de la raíz, disminución de la aireación y de la presión radical. Todo lo anterior impide que la raíz pueda captar los iones calcio y la carencia de este mineral favorecería la incidencia de la enfermedad.

Figura 46. Lechuga con hojas manchadas

El nitrógeno es un elemento esencial para el proceso de fotosíntesis y su carencia puede tornar clorótica a la planta y reducir su crecimiento.

Diversos pueden ser los motivos que causen una alteración en la disponibilidad del nitrógeno. Una drástica reducción en el volumen de poros del suelo, luego de un evento de compactación, puede incrementar la aparición de condiciones de anaerobiosis, en la medida que dichos poros sean ocupados por agua. La situación anteriormente planteada es propicia para afectar o modificar la mineralización del nitrógeno. Además, la falta de oxígeno puede incrementar la actividad de un grupo de microorganismos anaeróbicos que ocasionan pérdida de nitrógeno por desnitrificación. De hecho, la evaluación de valores altos de nitritos en el suelo es usado como indicador de sobrecompactaciónes que provocan baja difusión de oxígeno y por ende una insuficiente oxidación del nitrógeno. Los nitritos, no pueden ser absorbidos por las plantas y, por lo tanto, en estas condiciones es muy probable encontrar deficiencias de nitrógeno.

Smittle y Williamson (1977), al estudiar la eficiencia del uso del nitrógeno bajo la condición de suelo compactado en un cultivo hortícola, encontraron diferencias estadísticas significativas en el contenido de nitrato en el pecíolo de las hojas al comparar tratamientos no compactados y compactados, no encontrándose dichas diferencias en los suelos. Estos resultados son atribuidos al crecimiento superficial de la rizósfera dado por la compactación y la alta movilidad de los nitratos que se lixiviaron por debajo del límite de exploración del sistema radicular del cultivo.

Ball *et al*, (1999) reportan, en ensayos realizados a campo con tratamientos sin compactación y con compactación (leve y elevada). Determinaron que los tratamientos de mayor compactación incrementaron la pérdida de N_2O luego de la aplicación de fertilizantes o de la incorporación de residuos, en mayor medida que el testigo sin compactación o el tratamiento de compactación leve. Los mismos autores afirman que dicho gas incrementa el calentamiento global y provoca la disminución del ozono atmosférico.

Al respecto de lo apuntado, Hassink (1992), Hassink *et al,* (1993) reportan, en estudios realizados en diferentes suelos, una correlación negativa entre la mineralización del nitrógeno y la presencia de poros menores a 1,2 micrones. Breland y Hansen (1996), determinaron en sus ensayos que el efecto de la compactación del suelo sobre la mineralización del nitrógeno es mayor a contenidos altos de humedad del mismo, aunque sin haber encontrado evidencias de anaerobiosis. La reducción de la mineralización, para la condición de suelo compactado, ascendió al 18 %, en relación a las determinaciones sobre suelo no compactado. Dichos autores asocian el efecto encontrado a un retardo en la transformación de la materia orgánica y de la biomasa microbiana, motivada por la protección física dada por la compactación contra ataques de nemátodos o microorganismos.

Alakukku y Elonen (1995), evaluando el efecto de la compactación por tránsito sobre la reducción de la mineralización del nitrógeno en cultivos anuales, determinaron una disminución de 20 $kg.ha^{-1}$ en lo que respecta a la disponibilidad del mineral.

Las condiciones de preparación y estado de suelo que se evidencian para la producción hortícola de asiento (colocación directa de la semilla en la parcela) predispondrían a la aparición del fenómeno apuntado en párrafos anteriores. La necesidad de preparación de una adecuada cama de siembra, con una granulometría de agregados acorde para recibir una semilla, en la mayoría de los casos, de pequeñas dimensiones, junto con la presencia de un tenor de humedad adecuado para conseguir la germinación en tiempo y forma, dejan al suelo con una alta susceptibilidad a la compactación inducida. Esta situación se agrava por la intensidad de las labores culturales presentes en este sistema productivo.

Sitaula *et al,* (2000) estudiaron el efecto de diferentes grados de compactación del suelo sobre la emisión de N_2O, tanto en suelos fertilizados como en no fertilizados. Determinaron que la misma fue mayor en suelos compactados frente a los no compactados y que, en los tratamientos compactados y fertilizados con NPK (nitrógeno, fósforo y potasio), dicha emisión fue cuatro veces mayor. Encontraron incrementos del 44% para los tratamientos compactados y del 170 % para los compactados y fertilizados ($P \leq 0.05$). Estos autores establecieron, además, que a mayor contenido de humedad del suelo (porcentajes del 45% V/V), se vio favorecida la pérdida de nitratos por desnitrificación.

Existe por tanto evidencia suficiente como para considerar que la compactación reduce el aprovechamiento del nitrógeno aportado por medio de fertilizantes nitrogenados. Esto no sólo trae aparejado una elevación de los costos de producción, ante la necesidad de aumentar los volúmenes de fertilizante a utilizar, sino también, incrementa los riesgos de contaminación de napas freáticas por las sobredosis aplicadas.

Para ejemplificar los efectos que la compactación puede ocasionar sobre el suelo y el ambiente se presenta un gráfico extraído de Lipiec *et al*, (2003).

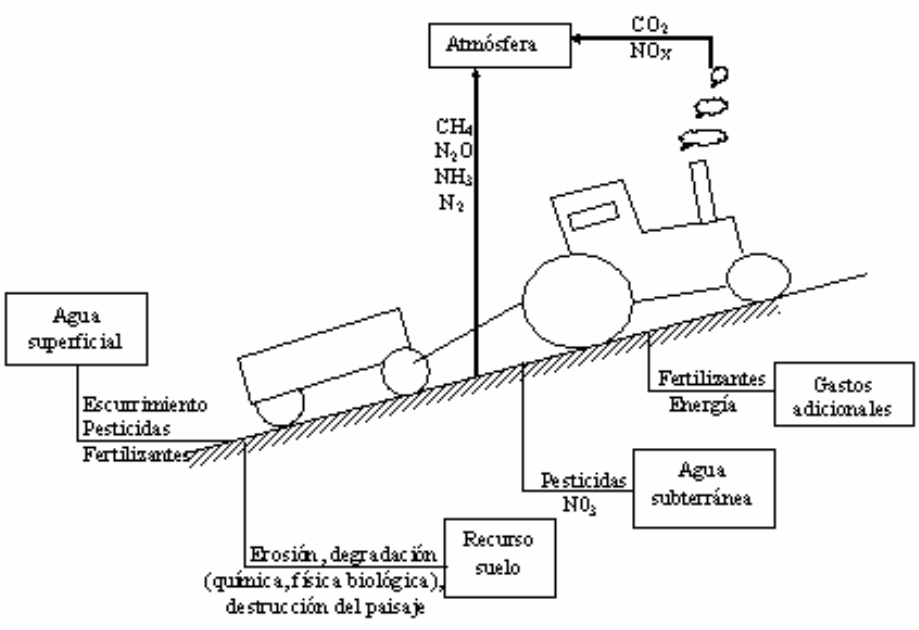


Figura 47. Algunos efectos de la compactación

Eficiencia de tracción versus compactación

Cuando se pretende una buena eficiencia de tracción, es decir un buen aprovechamiento de la potencia del motor en el uso de máquinas que son arrastradas o traccionadas, los parámetros a vigilar están muy claros. Por ejemplo son bien conocidas la relación entre la Masa del tractor, su Potencia, la Velocidad de Avance, y los límites de estas relaciones para los diseños de dos ruedas motrices, tanto como los de doble tracción. Estas relaciones pueden resumirse en la Figura 48 donde se demuestra que según la relación peso/potencia que tenga el tractor, debería desplazarse a distintas velocidades para alcanzar la eficiencia tractiva óptima:

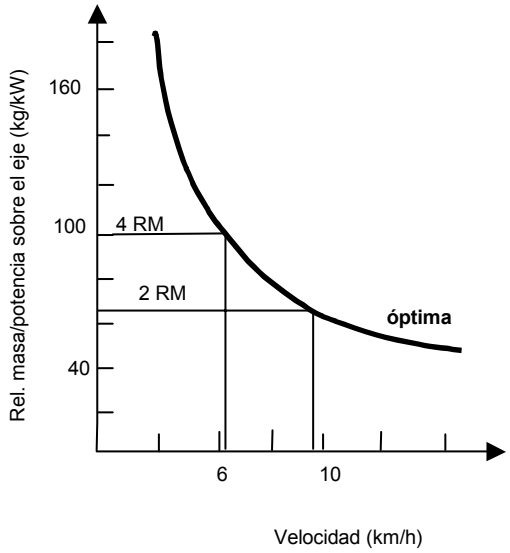


Figura 48. Velocidad de desplazamiento según relación peso/potencia para alcanzar la eficiencia de tracción óptima

Sin embargo, las cosas se nos complican cuando leyendo los consejos de aquellos que investigan y producen conocimientos en temas de compactación del suelo bajo tráfico,

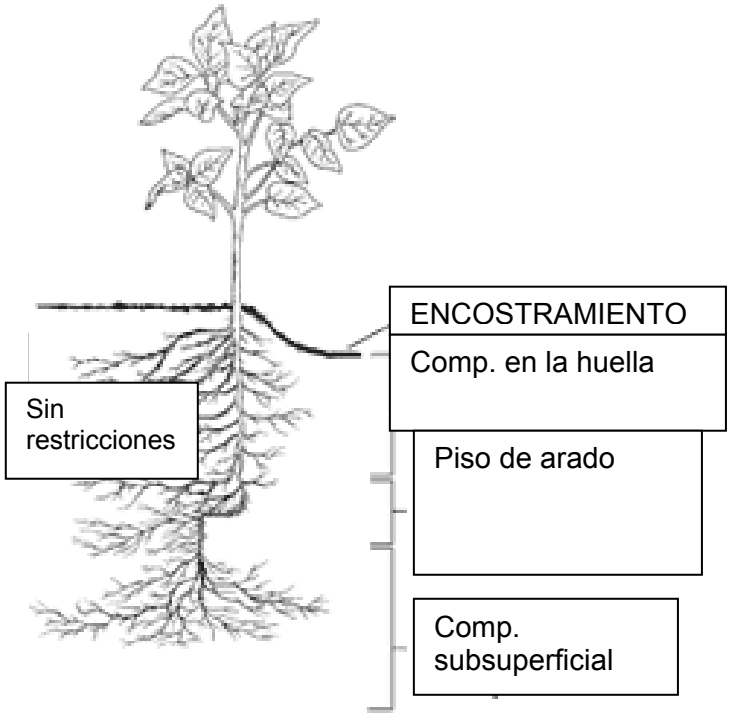
nos encontramos con que un límite razonable es un máximo de diez pasadas al año para el caso de tractores livianos como los de uso en horticultura, para evitar capas compactadas tan profundas que luego se hará muy oneroso, y a veces imposible, descompactarlas, y por lo tanto allí se hará acumulativa la compactación de cada una de las tareas. O bien que no podemos transitar sobre suelo productivo con nada que pese más de cinco mil kg por eje.

Figura 49. Compactación con formación de huellas

Problemas visuales de los suelos compactados

Formación de huella

Piso de labor



Encharcamiento

Interacción del suelo con las ruedas

La circulación sobre terreno agrícola difiere de las superficies duras. La humedad presente es quien hace la gran diferencia en la susceptibilidad a ser compactado en exceso.

En la mayoría de las situaciones el suelo no soporta la presión sin producirse deformaciones permanentes (superación del límite elástico).

El tamaño, presión de inflado y dureza de la carcasa se encuentran entre los principales parámetros que inciden sobre el efecto causado.

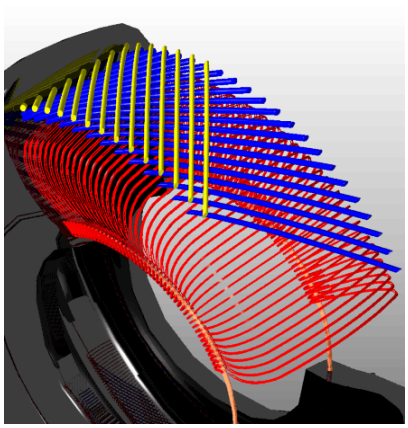


Figura 50. Neumático de carcasa diagonal

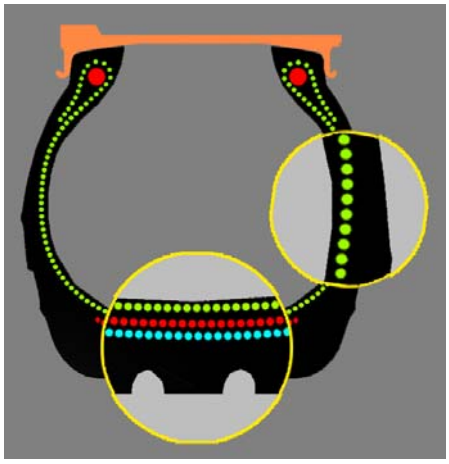


Figura 51. Neumático radial

Neumáticos de carcasa radial: tienen ventajas sobre los de carcasa diagonal. Brindan una vinculación al suelo que garantiza mayor superficie de apoyo. Y por lo tanto menor presión sobre el suelo, disminuyendo la compactación en superficie o huellas. En los neumáticos aún convencionales en el país, de carcasa diagonal, la mayor flexibilidad de su estructura hace que su superficie de apoyo disminuya mucho con presiones por encima de la aconsejable. En ese caso la presión sobre el suelo se hace mayor y por lo tanto su compactación en superficie también. La compactación en superficie, esto es la formación de una huella, durante el paso del tractor, depende básicamente de la presión en el área de contacto de la rueda con el suelo (Fig 43 y 44).

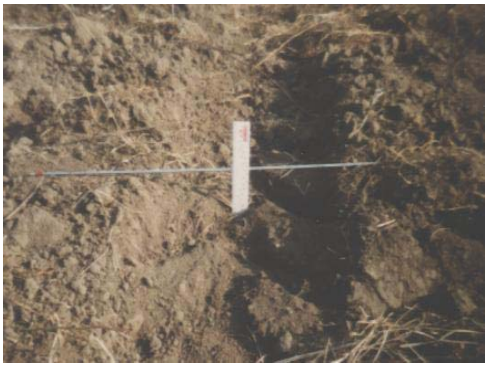


Figura 52. Medición de profundidad de huella

Figura 53. Uso de perfilómetro

La compactación en zonas más profundas, depende fundamentalmente del peso total del tractor, con independencia del área de contacto que la rueda le brinde.

Consejos útiles para evitar la sobrecompactación:

- **Adecuada dotación de cubiertas:** Usar las cubiertas de mayor tamaño o bien duales redundará en una menor compactación superficial
- **Manejo de peso y presiones de inflado:** Quitar los lastres o contrapesos en aquellas labores de bajo esfuerzo de tiro. Allí son innecesarios pues no habrá un importante patinamiento. Evitaremos así incrementar las pérdidas en el autotransporte del propio tractor y minimizaremos la compactación
- **Control del tráfico:** Planificar las tareas de forma de mantenernos dentro del mínimo de pasadas que el cultivo demande.
- **Descargas en cosecha:** La cosecha implica el retiro del predio de mucho peso en productos. Situar el carro que lo transportará en un borde del cuadro de producción, llevando lo cosechado hasta allí, puede minimizar el pasaje de uno de los conjuntos más pesado
- **Combinación de labores:** Si en un pasaje del tractor resuelvo dos operaciones, tendré las ventajas provenientes de una pasada menos
- **Limitantes al peso por eje:** Valores de peso por eje que debieran respetarse:
    - Hakannsson (1988) 5 toneladas
    - Botta (1998) para Argentina 4 toneladas en el eje trasero
- **Equipos doble tracción de ruedas iguales trabajando sobre la misma huella:** significaría el uso de tractores del tipo articulados, aún no frecuentes en Argentina de porte utilizable en horticultura
- **Evitar el tráfico cuando la humedad es alta:** Es la principal herramienta a manos del responsable del manejo del suelo
- **Aprovechamiento de la potencia mediante elementos mecánicos a la toma de potencia en lugar de solamente el tiro:** Siempre que la maquina utilizada pueda evitar tomar movimiento del suelo para asistencia de sus órganos activos, pues habrá un beneficio en la menor necesidad de peso del tractor
- **Armonización de equipos. Incremento de las velocidades de trabajo en lugar de anchos con grandes demandas de esfuerzo:** Siempre existe la coyuntura de hacer trabajos de tracción con equipos de mucho ancho de labor, que obligarán a contrapesar mucho el tractor para evitar altos patinamientos, o bien usar equipos reducidos en su ancho de labor, que demandarán menos esfuerzo de tracción, pero seguramente puedan usar la potencia del tractor dándoles una mayor velocidad de avance. Estos últimos podrán usar un tractor más liviano o menos contrapesado

DESCOMPACTACIÓN MECÁNICA DEL SUELO

Ing. Agr. Roberto Balbuena

Tal como se ha explicado anteriormente, los procesos de degradación física del suelo conllevan asociados riesgos de consolidación y compactación del mismo que limitan el normal desarrollo de los cultivos. También es ampliamente conocido, que existen diversas estrategias y metodologías para su prevención y eventual solución. La mecanización agrícola aporta en este sentido, distintas alternativas según sean las características que presenta el terreno, la profundidad en la cual se encuentra la zona compactada, el desarrollo y la severidad del proceso. No obstante ello, debe quedar en claro que la intervención a través del laboreo del terreno para , eliminar, disminuir, atemperar o tratar de solucionar sus efectos adversos, debe constituir en lo posible la última opción, cuando el problema se encuentra claramente identificado y analizadas las posibles consecuencias de la intervención mecánica, consensuando además las acciones posteriores.

En alguna medida, las acciones de descompactación pueden ser comparadas con las decisiones de realizar una cirugía en el reino animal. No se operan todos los problemas; por lo general, se establecen diferentes acciones y terapias para su solución. Normalmente "se opera" cuando el problema no puede ser resuelto de otra manera y los riesgos son lo suficientemente altos para la continuidad de la vida, en nuestro caso del sistema productivo. En el mismo sentido, la operación será tanto más riesgosa cuanto más invasiva, profunda, resulte. Asimismo, los procesos de compactación más sencillos de solucionar serán los de carácter superficial, mientras que los de mayor profundidad serán siempre más costosos y los resultados menos precisos, seguros, durables y de mayor costo

Zonas compactadas

Si bien existe una enorme diversidad de situaciones de degradación-compactación de suelos, las mismas para su análisis y solución podrían reducirse según se ha explicado anteriormente a tres niveles, en acuerdo con la Figura 54.

Figura 54.Situaciones de degradación-compactación y su remediación mecánica

El encostramiento es, seguramente, la problemática más conocida por parte de los agricultores que producen al aire libre, fuera de los invernáculos, como producto de precipitaciones ocurridas próximas al momento de siembra o implantación de los cultivos. El trabajo con implementos de labranza secundaria, rastras de discos, de

dientes y trabajos con rotativas o fresadoras, es la manera que, por lo general, se utiliza para poder recomponer temporalmente una estructura del suelo que permita la siembra de las especies hortícolas, su germinación y emergencia o la implantación de las especies transplantadas. El trabajo de dichos implementos, a nivel superficial, no ocasiona mayores inconvenientes para los productores y operarios, pero sí tiene consecuencias físicas a nivel del suelo. En dichas condiciones, suelos blandos y húmedos por debajo de la superficie de la costra, predisponen riesgos de compactación del sustrato muy altos como resultado de pasajes posteriores de conjuntos tractor-implementos.

Es conocido que los tractores suelen ser de escaso peso (masa), y por lo tanto se puede esperar que los daños en cada pasaje sean de no muy alta magnitud, pero resulta menos claro para los productores que el pasaje repetido en una misma senda incrementa la magnitud del daño, como así también la profundidad a la que el mismo se produce, pese a que los mayores perjuicios se registren a nivel superficial. A ello colabora que los tractores usados a nivel hortícola no poseen neumáticos con una adecuada superficie de apoyo, dadas las restricciones que se imponen, principalmente en el ancho de la banda de rodamiento, como consecuencia de los sectores disponibles para el tránsito, una vez que se establecen los surcos de cultivo.

Por lo expuesto, no se encuentra en las producciones hortícolas uno de los factores principales para ocasionar en un solo pasaje compactación a nivel subsuperficial tal como es superar una carga por eje mayor a los 4 a 5 Mg. Sin embargo, el trabajo de máquinas agrícolas y el tránsito de tractores sobre suelo desnudo, y muchas veces húmedo, el pasaje repetido en una misma senda, la escasa superficie de contacto rueda suelo, neumáticos con carcasa diagonal, excesivas presiones de inflado, constituyen un conjunto de elementos capaces de generar problemas severos de compactación a nivel superficial, en el corto plazo, y a nivel subsuperficial en el mediano y largo plazo.

Para aliviar los inconvenientes de este tipo de compactación inducida por tránsito y trabajo con máquinas, suelen utilizarse escarificadores de cinceles y subsoladores, que requieren de algunos conocimientos básicos para su correcta operación y regulación, para alcanzar adecuados niveles de prestación energética y agronómica.

En forma preliminar, es posible establecer que los subsoladores, como su nombre lo indica, son los implementos adecuados para la roturación de capas compactadas en profundidad. Dentro de este tipo de aperos, algunos diseños presentan diferencias en los montantes y órganos activos que les otorgan distintas aptitudes y características de trabajo del suelo.

Por lo contrario, los escarificadores de cinceles solamente resultan adecuados para el fracturamiento de estratos del terreno a nivel superficial, siendo necesario establecer las características de la capa compactada para decidir si es posible la utilización de montantes flexibles (procesos de compactación leves, muy superficiales o incipientes) o rígidos (compactaciones de mayor importancia, piso de arado).

Las razones de esta diferenciación será analizada posteriormente, a partir del conocimiento de algunos aspectos de diseño y ensayos experimentales realizados en diversas condiciones de suelo.

Labranza vertical: cinceles y subsoladores

La labranza vertical del suelo es una denominación habitual en la República Argentina, de un conjunto de labores que se llevan a cabo mediante el uso de escarificadores, que abarca desde implementos para laboreo primario como de laboreo secundario del suelo agrícola. Esta particular denominación hace referencia

principalmente a la posición de los principales órganos activos en el suelo, más que a los efectos de roturación que se realiza sobre el mismo. Muchas veces, se ha indicado que el trabajo de escarificación por parte de las máquinas agrícolas se corresponde con el corte vertical del suelo, a diferencia de los arados que efectúan un corte horizontal y vertical del terreno con una inversión parcial del mismo. Sin embargo, los escarificadores utilizados en la agricultura para el laboreo primario del suelo, la descompactación de estratos a nivel subsuperficial o preparación de la cama de siembra no realizan principalmente un trabajo de corte vertical del terreno. Por lo contrario, cuando algún escarificador efectivamente realiza un corte vertical del suelo, seguramente no está haciendo un trabajo adecuado, no cumple con los objetivos de labranza formulados y, posiblemente, esté generando problemas no previstos y mayores costos inútiles.

Más allá de los términos y denominaciones, estas clasificaciones sirven usualmente para el entendimiento y diferenciación de aperos, en acuerdo con los principios de roturación, los objetivos de labor y los efectos sobre características físicas, mecánicas y agronómicas del suelo agrario. Tal es así que, a nivel técnico y en el ámbito productivo, a los cinceles, en muchas de sus variantes, se los conoce como arados de cinceles. A implementos que presentan similares órganos activos (rejas) y montantes (arcos, timones), de menor tamaño que los de los cinceles, usados para el laboreo secundario del suelo se los conoce como cultivadores de campo o cultivadores de rastrojos. A veces, se identifica a los órganos de trabajo en forma genérica como dientes, involucrando en este concepto a montantes y rejas

En definitiva, más allá de sus nombres técnicos o vulgares, se tratará de informar, explicar, analizar y alcanzar conclusiones sobre los principios de trabajo, características de diseño y efectos sobre el suelo de los implementos utilizados en la "labranza vertical del suelo", independientemente de su clasificación y denominación, técnica o común. Sin desconocer la conveniencia del uso de una determinada denominación técnica, de adherir en mayor o menor grado a algún principio de clasificación, en el desarrollo de los diferentes aspectos se utilizará en forma alternativa el término escarificadores o arados. Tal vez lleve en parte a confusión, pero como dice un viejo refrán "el que avisa no traiciona". En función de encontrar los mejores canales de comunicación para un lector, es que se recurrirá a los términos, palabras, sinónimos y expresiones que en cada caso mejor expresen el concepto.

Principales características de la labor con escarificadores de cinceles y descompactadores

Cuando un diente de un escarificador rompe el suelo trabajando a una profundidad determinada, el área afectada así como la resistencia ofrecida son función de las variables mecánicas del suelo. En este sentido durante los últimos cuarenta años se han venido sucediendo una serie de teorías que tratan de explicar el proceso de rotura del suelo en diferentes estados y con distintas herramientas.

Los primeros estudios de la rotura del suelo bajo la acción de empuje con una superficie vertical rectangular de muy poca anchura, denominan "diente" a toda aquella superficie rectangular en la que la relación entre la profundidad de trabajo y su anchura es mayor que 1, diferenciándola de una reja o una hoja empujadora. Llaman "reja" u "hoja empujadora" a los implementos en que la superficie del órgano activo tiene una relación entre la profundidad de trabajo y el ancho es menor que 0,5. Curiosamente, algunos de los órganos activos que comúnmente son conocidos como rejas de cincel o subsolador serían según esta clasificación "dientes". Las observaciones, realizadas en un canal de tierra conteniendo arena húmeda, pusieron de manifiesto que al desplazarse un diente en el terreno la rotura del suelo se producía

tras la sucesión de varias etapas consecutivas. En primer lugar, y tan sólo después de que el diente se ha desplazado unos pocos centímetros (2,5 cm) aparece en la superficie del suelo una zona abultada semicircular. Cuando el desplazamiento es algo mayor se forma una grieta que envuelve a toda la zona abultada y que termina en la pared del propio diente. Si el desplazamiento del diente es aún mayor, 5-6 cm. Aparece, en el interior de la zona anterior, otra zona perfectamente delimitada por dos grietas que partiendo de ambos lados de la pared del diente convergen por delante de la misma a la altura de su punto central (Figura 55).

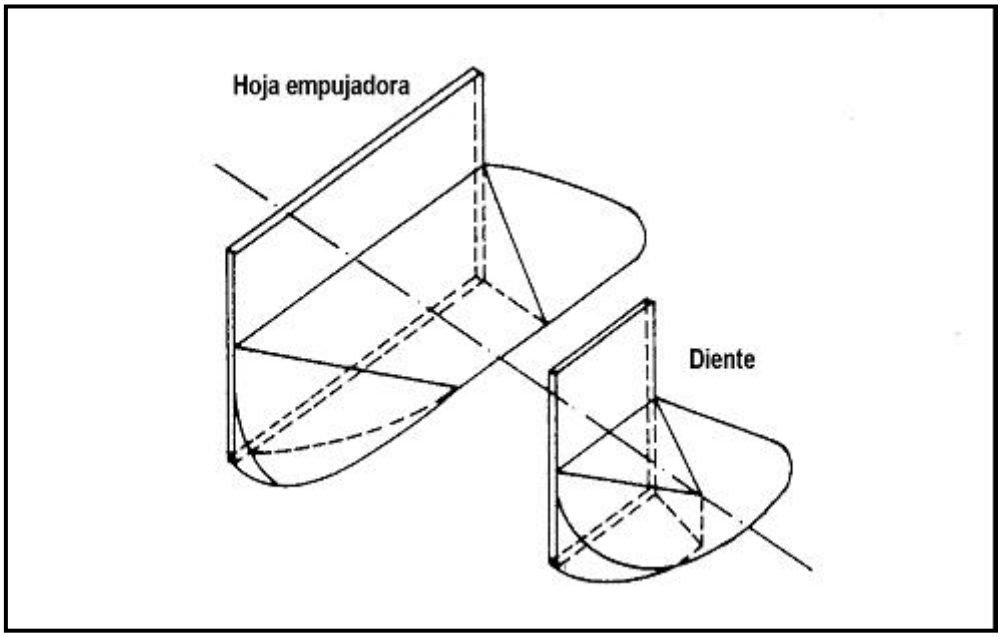


Figura 55. Perfil de roturación de suelo al pasaje del órgano activo

Se forma así una cuña de tierra que se comporta como si fuera parte integrante del diente. A medida que el diente avanza en el terreno, la cuña de tierra va cortando al suelo a la vez que lo desplaza lateralmente y hacia arriba. La porción inferior de la cuña tiene forma circular (Figura 55), de suerte que ella misma va ascendiendo por la pared del diente y acaba desmoronándose cuando no es capaz de soportar su propio peso. La cuña no desaparece porque va tomándose continuamente con la tierra que recoge la base del diente. Esta forma básica de rotura del suelo también se observa en el campo aunque con más dificultad y con algunas diferencias motivadas por la presencia de terrones y agregados. Si la resistencia de los terrones o agregados es mayor que la de la masa de suelo, las grietas se forman entre los terrones y no aparecen tan nítidamente semicirculares como en el caso anterior.

Posteriormente, fueron identificados los principales factores que permitían predecir el comportamiento energético de los implementos con dientes, los cuales eran el Peso específico del suelo, el Angulo de rozamiento interno, la Cohesión,: el Ángulo de rozamiento metal suelo, el Coeficiente de adherencia metal-suelo, el Ángulo de ataque de la herramienta, la Sobrecarga del suelo sobre el diente, la Profundidad de trabajo y el ancho del diente como los de mayor importancia.

Cuando el ancho del órgano activo es la tercera o cuarta parte de la profundidad de trabajo, el modelo de rotura del suelo cambia en relación al caso anterior, ya que existe una alteración lateral al diente además de la formación de una cuña de tierra justo delante de la herramienta. A este tipo de aperos se los denomina "de dientes estrechos". La totalidad de los aperos de labranza vertical se corresponde

con este tipo de implementos, de "dientes estrechos" en su configuración básica original. Sin embargo, dada la versatilidad que presentan, también pueden montarse rejas para cumplir con distintos objetivos de labor y / o adaptarse a diferentes condiciones de trabajo.

En la Figura 56 se muestra un arco flexible con una púa (reja, diente) convencional. Queda claro, que no existe ninguna parte del órgano activo que corte el terreno, en forma vertical. No existe ningún elemento afilado para cumplir dicha acción. Por lo tanto, el suelo no es cortado por los escarificadores sino sometido a una presión, tensión por una superficie relativamente larga y estrecha (diente, reja, púa), a la cual se ofrece una resistencia mayor o menor según el tipo y estado del terreno. Superada dicha resistencia del suelo, se podría explicar en una forma sencilla, el suelo "estalla", se fractura y desagrega de una forma compleja que se analizará posteriormente. En condiciones de suelo firme, compactado, poco húmedo a seco, todos los aperos de labranza vertical, cinceles y descompactadores trabajan de la misma forma y roturan el suelo bajo el mismo principio.

Figura 56. Arco flexible con reja convencional reforzada

Arado de cincel o escarificador de cinceles

Dentro del amplio espectro de aperos para labranza primaria del suelo, los escarificadores surgieron como una alternativa, frente a los arados de vertedera y de casquetes (discos) para su inclusión en sistemas de laboreo de conservación. Se trata de aperos de labranza cuyas herramientas de trabajo son dientes, o rejas, montados sobre brazos flexibles o rígidos, los cuales fragmentan el suelo con formación de grandes fisuras y tierra fina, con escasa inversión y poca traslocación de los estratos del terreno. El perfil del suelo trabajado por este implemento, como consecuencia de la forma de roturación del terreno, genera, en condiciones de trabajo adecuadas, una importante disminución de la densidad aparente del suelo, un espacio poroso importante para almacenar el agua de lluvia, no favoreciendo además la formación de piso de labor semejante a los ocasionados por los arados de vertedera y disco. Esto se debe a que la relación entre la superficie de la herramienta de trabajo, y la fragmentación en el suelo es mucho más pequeña en el arado de cinceles que en los arados convencionales. Podría expresarse esta idea, entendiendo, como se explicó

anteriormente, que el suelo es roturado hacia arriba, adelante y hacia los costados de la reja. La fracción de suelo labrada es ampliamente superior a la superficie de la reja, por lo cual los llamados efectos laterales son normalmente 4 veces mayores que la misma

Ventajas del arado de cincel

Los escarificadores de cinceles presentan una serie de ventajas operativas que favorecieron su rápida difusión en el mundo a partir de la segunda mitad del siglo XX, mientras que en la República Argentina, su expansión en las ventas se registró alrededor del año 1970, aproximadamente. En este sentido, Maroni (1990) analizó la evolución en el mercado de los equipos de labranza vertical sobre los implementos de labranza convencional. Tomando como base 100 las ventas de arados de reja y vertedera, encontró que el porcentaje para los equipos de labranza vertical evolucionó del 13% en 1976 al 59% en 1983, 125% en 1986 y 180% en 1989.

Esto pone en evidencia un claro desplazamiento de las máquinas convencionales de labranza, arados de vertedera, arados rastras y arados de casquetes, principalmente en la región pampeana, durante aproximadamente una década, que posteriormente decayó, encontrando un equilibrio con la utilización complementaria con rastras de discos de doble acción. Esta disminución del uso de escarificadores de cinceles puede asignarse en parte por las limitaciones encontradas para el laboreo en diferentes tipos y estados del terreno que determinaron la introducción y desarrollo de distintos órganos activos que, colocados sobre un mismo arco, permitieran incrementar la oportunidad de labor. Pese a ello, muchos de los mismos no resultaron mayormente difundidos y adaptados debido a la inadecuada caracterización y determinación de su prestación. (Balbuena *et al*, 1992). No ocurrió lo mismo en las explotaciones intensivas, donde nunca alcanzaron similar difusión, pese a no favorecer, por la forma de roturación del suelo la formación de "piso de arado", ni compactación, siempre que se atienda a recomendaciones de uso elementales.

En un análisis general de las causas de su rápida aceptación por parte del mercado y de los usuarios de máquinas agrícolas, pueden enunciarse lo siguiente: Los escarificadores son implementos agrícolas que presentan órganos activos por lo general simples, simétricos, o que pueden disponerse sobre el apero de forma tal que presenten **simetría lateral**, tomando como referencia el plano medio del mismo paralelo a la dirección de avance del conjunto tractor-implemento.

Esto implica que el mismo no sufra mayores desviaciones laterales, producto de las fuerzas generadas por el suelo sobre los órganos activos, puesto que las mismas se producirán en dirección contraria al avance del tractor. En el caso de órganos activos asimétricos, los mismos pueden disponerse de forma tal que las componentes del esfuerzo de tracción en el plano transversal a la dirección de avancen se compensen. Las ventajas comparativas con otros aperos se producen principalmente en la simplicidad de regulación y desplazamiento del conjunto tractor apero. En virtud de ello, el sistema de enganche puede simplificarse, en los equipos de arrastre, utilizándose principalmente el tipo "lanza", fija o articulada, puesto que el mismo deberá resolver básicamente el vínculo con el tractor y la nivelación del equipo en el plano longitudinal. Asimismo, en los equipos montados, no es necesario contar en el equipo con un eje acodado, spin o cigüeña en el vínculo de los dos brazos inferiores, ya que no existirán esfuerzos laterales que tiendan a desplazar el equipo, realizándose las regulaciones de nivelación sobre el brazo inferior derecho y el brazo superior del enganche de 3 puntos del tractor.

-El **ancho de corte o trabajo** de los escarificadores es habitualmente variable, con amplios márgenes que permiten adecuar en mejor medida que otros aperos de labranza los requerimientos energéticos con la potencia disponible en el tractor. Esta variación del ancho de labor suele realizarse a través de la adición o quita de sectores de bastidor, suplementos, como así también a partir de la modificación de la distancia entre arcos (líneas de acción de los dientes o rejas sobre el terreno. No obstante lo expuesto, en cualquier caso los escarificadores permiten sacar o adicionar arcos para adecuar los requerimientos y conformar armónicamente el conjunto, de una manera fácil, puesto que habitualmente la fijación del arco a la estructura del bastidor se efectúa por medio de grampas roscadas o piezas de vinculación tomadas con 3 ó 4 tuercas, de fácil operación. También ha sido difundida, la posibilidad de quitar o adicionar sectores de bastidor, lo cual amplía los márgenes de trabajo en cuanto a las posibilidades de modificación del ancho de labor. En todas las configuraciones debe tenerse en cuenta la necesidad de cubrir la trocha del tractor (ancho de pisada) para evitar que en las pasadas subsiguientes se pise la zona ya trabajada por el implemento.

-**Versatilidad para intercambiar órganos activos**. Existen a nivel comercial un conjunto de órganos activos posibles de colocar sobre un mismo montante, los cuales pueden removerse con suma facilidad. La forma de sujeción de los órganos activos al arco es mediante 2 bulones de cabeza fresada. La medida que existe entre los agujeros que se encuentran sobre el arco está normalizada, por lo cual no existen problemas de incompatibilidad entre las distintas rejas de diferentes proveedores. Los diferentes órganos activos permiten cumplir con diferentes objetivos de labranza, en algunos casos, como así también la mayor o menor adecuación de los escarificadores a diferentes condiciones de laboreo.

- **Bajo costo de adquisición por unidad de ancho de labor**. Si bien el costo total de los escarificadores modales no es bajo, al calcular el costo por metro de ancho de labor, el mismo es reducido comparado con otros implementos de labranza primaria. Por un lado, la penetración de los escarificadores es por succión, por lo cual no requieren un peso/órgano activo elevado para alcanzar las profundidades habituales de labor. A ello se suma la simplicidad de las estructuras de soporte y las características de los montantes del tipo flexible. Asimismo, los mecanismos de elevación, descenso y regulación de la profundidad de trabajo del apero se resuelven habitualmente, en los equipos de arrastre, a partir de un único eje acodado sobre el cual se montan 2 o 4 ruedas, según el ancho de labor del implemento. En forma opuesta, en los equipos montados usados en horticultura, los cinceles suelen presentar un par de ruedas de apoyo, que encarecen, en alguna medida su costo. Esto se debe a la variabilidad del esfuerzo de tracción que dificulta el trabajo del sistema hidráulico en control de carga, de no contar con un apoyo que limite en algún momento la profundidad. A modo de resumen, es una máquina con poco costo de materia prima, acero, como así también de diseño sencillo y por lo tanto, de relativamente bajo costo total.

- **Baja energía requerida por metro de ancho de labor**. Si bien se menciona habitualmente que los escarificadores requieren bajos esfuerzos de tracción/m de ancho de trabajo, la resistencia específica al laboreo no mantiene las mismas características. Sin embargo, cuando no resulta necesario alcanzar una profundidad de trabajo homogénea del perfil, los esfuerzos traccionales

totales serán reducidos, permitiendo alcanzar de dicha forma una elevada capacidad de trabajo del conjunto.

Elementos del arado cincel

a) arcos

En relación con los arados de cinceles, existen básicamente 2 tipos de arcos sobre los cuales se ubican los órganos activos. Por un lado, los de mayor difusión en la República Argentina, con montantes del tipo flexible, a los cuales se los ha denominado usualmente cinceles o arado de cinceles. Por otra parte, de menor inserción en este mercado, pero usuales en EEUU, se encuentran los cinceles de montantes rígidos. En estos tipos, no existen mayores diferencias en los aspectos básicos de diseño, como ser el radio o radios de curvatura de los arcos que determinan el ángulo de ataque de las rejas que sobre ellos se colocan.

Las diferencias fundamentales se encuentran en los materiales utilizados para su construcción. La flexibilidad de los arcos se alcanza en función de las aleaciones en base a cromo, vanadio y molibdeno, las cuales permiten otorgar las características indicadas. La mayor o menor proporción de los elementos mencionados incide sobre las características de las vibraciones de los arcos, en cuanto a magnitud y frecuencia. A ello contribuye también la sección de los mismos. El equipamiento estándar se puede caracterizar por un ancho de 50,8 mm y un espesor de 25,4 mm (2″ por 1″). Como equipamiento opcional, se ofrecen arcos de igual ancho pero con espesores de 1 ¼″ o excepcionalmente de 1 ½″. El mayor espesor de los arcos contribuye a una mayor rigidez del conjunto de órganos activos (arcos - rejas) lo cual determina variaciones en las características de las vibraciones que se producen en la interacción con la resistencia del suelo. También se difundió la colocación de sobrearcos (de similares características que los arcos utilizados) en el sector recto de vinculación al bastidor y el primer sector curvo cercano al mismo, en número de 2 ó 3 elementos. Estos diseños, aportan mayor rigidez y durabilidad al conjunto, mostrando mayores aptitudes cuando los cinceles de arcos flexibles deben desempeñarse con altos esfuerzos de tracción. No obstante ello, dado que en los mismos no cambian las medidas de despeje o luz libre, no resultan adecuados para trabajos de descompactación profunda, quedando limitados por lo expuesto, habitualmente, a trabajos de roturación en los primeros 0,30 m de profundidad.

En lo que respecta al efecto que ocasiona las vibraciones de un montante flexible, en situación de trabajo, hay que dejar claro que las mismas no contribuyen a la roturación de los agregados, como erróneamente suele creerse. Los arcos flexibles, que se utilizan en nuestro país, suelen movilizarse en forma anteroposterior, ante esfuerzos traccionales importantes, con una amplitud y frecuencia que no favorece al fraccionamiento de los agregados. Para que un órgano activo fracture un agregado por vibración ésta debe ser de escasa amplitud y alta frecuencia, condiciones diametralmente opuestas a las que se verifican en los cinceles de uso modal en nuestro país.

Otra variable en el diseño de los arcos, se corresponde con los diferentes radios de curvatura que pueden presentar los mismos (Figura 57). Habitualmente, se encuentran arcos de 1, 2 ó 3 radios de curvatura. Los más difundidos entre estos tipos han resultado los de 1 radio de curvatura y los de 3 radios de curvatura. No existen mayores antecedentes de las mejoras o ventajas operativas de los diferentes tipos. En general, ambos poseen un radio similar en el sector donde se ubican las rejas del escarificador, el cual determina el ángulo de ataque de las rejas. En cuanto a los efectos operativos, en la medida que el despeje no resulte limitante, pareciera que los

arcos de un radio presentan una menor tendencia a los problemas de atoraduras, desplazando lateralmente los residuos vegetales en la medida que los mismos se van elevando. Los de tres radios de curvatura, a las profundidades habituales de labor, parece que presentan mayores dificultades con el manejo de los residuos, a las profundidades habituales de labor con estos implementos.

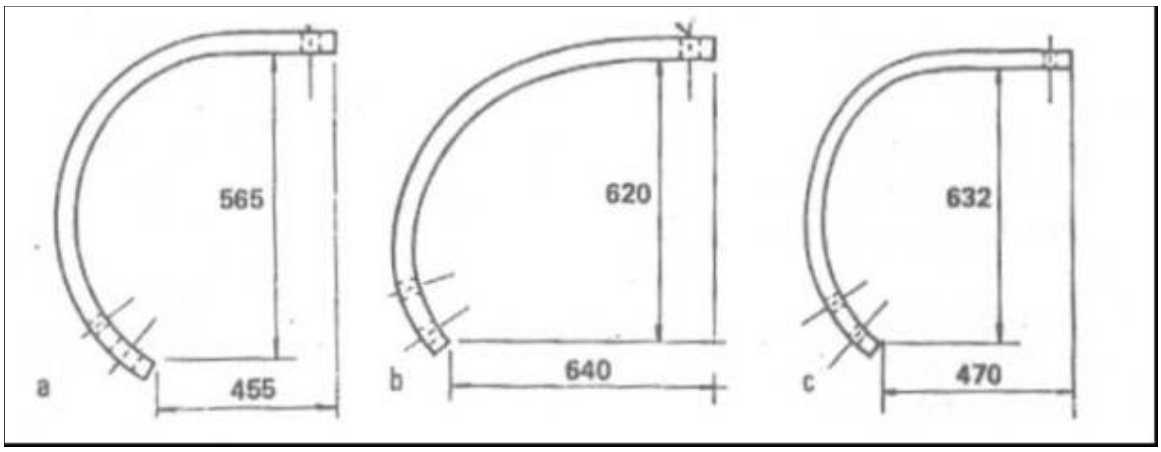


Figura 57. Diferentes radios de curvatura a) Un radio b) Dos radios c)Tres radios

En cuanto a los cinceles de arcos rígidos (Figura 59) generalmente presentan una sección frontal más reducida y una sección lateral de mayor desarrollo. A partir de estas características, puede deducirse que la fracción de suelo inmediatamente por delante de la reja no tiende, como es frecuente en los cinceles de 2" de sección frontal a elevarse siguiendo el arco para luego caer, lateralmente, produciendo un enterrado de residuos variable según diferentes cuestiones operativas.

Figura 58. Escarificador de arcos flexibles

Figura 59. Escarificador de arcos rígidos

Al resultar menor la sección en los rígidos, la elevación es menor, como así también resultan los desplazamientos laterales del terreno.

Los cinceles de arcos flexibles se montan sobre el bastidor de diferentes formas, pero las mismas permiten, cualquiera sea el tipo, su desplazamiento sobre el bastidor, como así también su remoción o eventual ubicación en otro plano de acción, a los efectos de alcanzar distintas configuraciones espaciales, que permitan su adecuación a las condiciones de trabajo en las que deberá desempeñarse. Los vínculos más simples del arco con el bastidor son a partir de 2 planchuelas y tornillos o grampas roscadas que sujetan al montante contra la sección inferior del bastidor. En estos sistemas, las planchuelas suelen presentar un orificio, al igual que los arcos, por lo cuales se ubicará un perno fusible, que tiene por función tanto fijar el arco en una posición determinada, evitando el desplazamiento antero-posterior, como así también las sobrecargas y eventuales roturas o deformaciones en plazos relativamente cortos. En los mismos, resulta importante la reposición del perno fusible por uno de idénticas características cuando el mismo se rompe, puesto que de no ser así, se facilitará la rotura del montante o se producirán frecuentes detenciones del trabajo por falla reiterada de los pernos.

Otro sistema de vinculación del montante al bastidor, se efectúa mediante una articulación y un pasador. El conjunto, se encuentra, unido a un resorte, cuya misión principal es la de actuar como mecanismo de seguridad, permitiendo el desplazamiento hacia atrás y hacia arriba, cuando la resistencia del terreno alcanza valores de esfuerzo que superan la tensión de los resortes. Por lo tanto, la regulación de dicha tensión resulta importante para la vida útil del arco y la reja. No obstante ello, cuando la misma no es la adecuada, estos resortes absorben todos los impactos y vibraciones de carga que se generan en el suelo. Este proceso, cuando es continuo, termina produciendo un desgaste acelerado del mecanismo en su conjunto, sin que realmente tenga beneficios en el laboreo del suelo.

El radio del tramo circular, correspondiente al sector de fijación de la púa, ha de ser un 20-25% superior a la profundidad máxima de trabajo a fin de que al ascender la tierra por el diente y posteriormente siguiendo la curvatura del brazo, no se produzca el efecto compactador que ejerce la parte superior del tramo circular del mismo, empuje en la dirección de avance y dificultades con el movimiento de los residuos.

Los ángulos de ataque, con respecto al plano horizontal, deben de estar entre 20-25° con ello se combina un mayor efecto de fragmentación (mayor área trabajada) con la menor resistencia ofrecida por el suelo. Con ángulos de ataque comprendidos entre 40 y 50°, además de incrementarse la resistencia del terreno, se produce el efecto de disminución del área trabajada, incremento del desmenuzamiento de los agregados y de la resistencia específica. Lamentablemente, predominan ángulos de ataque superiores a los 40º, que se incrementan rápidamente ante elevados esfuerzos de tracción.

Los cinceles de arcos rígidos se caracterizan por poseer la combinación de dos tramos rectilíneos que terminan en un diente robusto fuertemente fijado al brazo (Figura 59). Este tipo de cinceles se utiliza en terrenos pesados y compactados dejando una labor más aterronada que los de brazos flexibles. El ángulo de ataque es de 20 a 30º, con lo que se reduce el esfuerzo de tracción, aunque en algunas condiciones de suelo seco se dificulta la penetración inicial. No obstante ello, se encuentran diferentes diseños, algunos de ellos con mayores ángulos de ataque, inclusive con distintas posibilidades de ubicación de un perno fusible en la base del montante, que permite variar el mismo en un ángulo discreto (2 ó 3 posiciones).

Los aspectos relacionados al ángulo de ataque de las rejas dientes o púas resultan determinantes de aspectos energéticos y de labor según lo explicado anteriormente. Empero, dichos problemas no revisten excesiva gravedad en la medida que los trabajos se efectúen a profundidades inferiores a los 0,30 m, preferentemente

entre los 0,20 y 0,25m. Por lo tanto, se analizarán sus efectos, tanto para equipos con arcos flexibles como rígidos.

Figura 60. Arco rígido y reja convencional

b) dientes y rejas

Según el tipo de suelo, los arados de cincel pueden incorporar diferentes herramientas de trabajo. Dentro de las posibilidades existentes, las más difundidas han sido:

b.1) De roturación (convencionales)

Este tipo de púas o "rejas", utilizado habitualmente en los cinceles de arcos flexibles, de amplia difusión en todo el mundo, presentan una curvatura que ensambla adecuadamente con la curvatura de los montantes. Si bien existen pequeñas diferencias entre los distintos proveedores, las características constructivas son muy similares, estableciéndose pequeñas diferencias en la forma y tamaño de las puntas de las rejas, como así también en el ancho de las mismas.

Por lo general, las rejas "convencionales" son reversibles, de 50 mm de ancho, ligeramente reforzadas en las puntas, para los arcos de 25,4 mm de espesor (ver Fig. 51). De similares características, a veces de 60 mm de ancho, con puntas más reforzadas, se encuentran las rejas de "servicio pesado", las cuales requieren en algún sentido, su colocación sobre arcos de 38 mm de espesor, que resistan en mejor medida los mayores esfuerzos a los que se ven sometidos. Difícilmente se monten en arcos flexibles rejas de mayor ancho que el especificado, puesto que el incremento del ancho de la reja incrementará principalmente el esfuerzo de tracción, sin que se produzcan mejoras en la roturación del terreno. Vinculado a las características básicas de las púas o rejas, Payne and Tanner (1959), realizaron importantes avances en la incidencia del ancho de la herramienta sobre aspectos de diseño y energía requerida para la labor. Sus evaluaciones, efectuadas sobre la incidencia del ancho del órgano activo sobre los efectos laterales de roturación del suelo, establecieron que a partir de 50,8 mm los mismos permanecen constantes, en el rango de profundidades ensayadas, incrementándose el frente de labor únicamente en función del aumento de

la superficie de la reja. Además, menores anchos de la reja generaban menores efectos laterales, es decir menor área roturada en el plano transversal al desplazamiento del implemento.

A su vez, Willat and Willis (1965) modelizaron el área trabajada por escarificadores de arcos flexibles a partir de los datos relevados en ensayos en campo, estableciendo que los planos de roturación del suelo alcanzaban un ángulo de 45º, en la medida que la profundidad de trabajo no sobrepasaba una profundidad de 150 mm a partir de la cual el coeficiente de ajuste entre los valores medidos y los obtenidos a partir del modelo se alejaba significativamente de la unidad. Este último aspecto, se relaciona claramente con los problemas de profundidad crítica, de mucha mayor frecuencia e incidencia en los trabajos de descompactación subsuperficial.

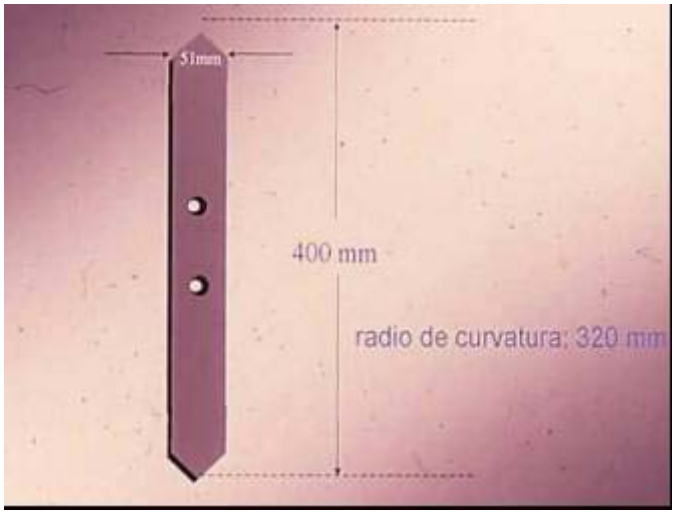


Figura 61. Dimensiones de una reja convencional

b.2) Rejas de diseño alado

Dentro de este tipo de rejas, se encuentran diversas variables que implican diferentes características operativas, energía requerida, como así también objetivos de labor capaces de cumplir. Tal vez, la reja de mayor utilización dentro de este tipo, haya sido la denominada "pata de ganso", la cual se ha empleado ampliamente para la roturación del suelo en labores de escarificación en terrenos con contenidos medios de humedad (Figura 62). También, se las conoce como rejas de escardillo chico, en acuerdo con denominaciones comunes comerciales. Como toda reja de diseño alado, la forma de la herramienta permite aumentar la denominada profundidad crítica, en relación con la que podría alcanzarse en similares condiciones con un diente estrecho. (ver descompactadores). Si bien existen distintos diseños, los más difundidos han resultado en labranza primaria del suelo las rejas de "corona baja", puesto que resultan las de menor desplazamiento del terreno, como así también de menor enterramiento de residuos y esfuerzo de tracción. El ancho total de la reja alcanza 160 a 180 mm para este tipo, mientras que las rejas de escardillo medias o grandes poseen anchos de 300 y 400 mm aproximadamente. A diferencia de las rejas "pata de ganso", estas últimas no se suelen utilizar a profundidades mayores a los 120 mm, puesto que los objetivos principales de labor se relacionan con el control de malezas, más que con la roturación del suelo. En estos diseños, prácticamente no existen posibilidades de producir procesos de compactación lateral, aunque en condiciones de humedad del

suelo pueden ocasionarse algo de compactación sobre el fondo de la labor, por un efecto de "fratachado" que puede ser más notorio cuando las rejas pierden el filo.

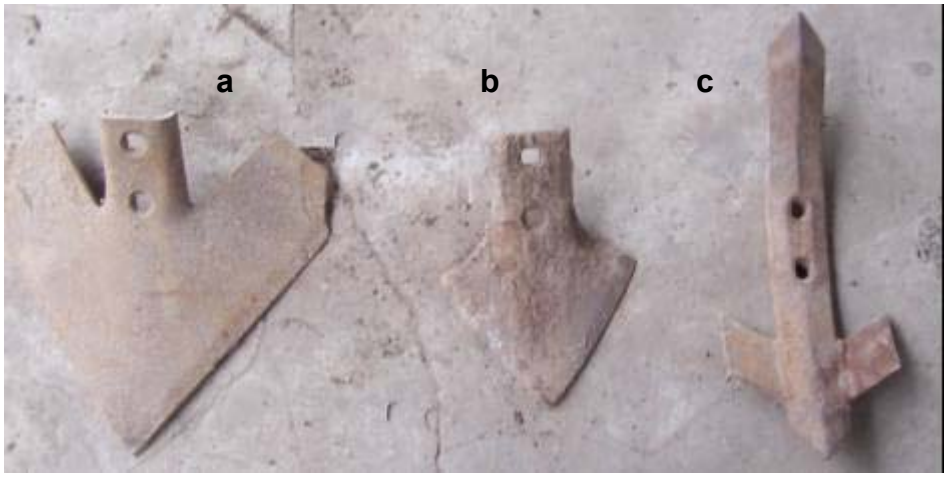


Figura 62. Rejas aladas a) Escardillo grande; b) pata de ganso; c) convencional alada

Patrón de roturación

A partir de fines de la década del 70, comenzaron a encontrarse precisiones sobre algunos de los problemas detectados para el trabajo con escarificadores, los cuales habían sido cuantificados muchas veces, pero no explicados. Muchas de dichas respuestas se hallaron en los estudios hechos sobre el trabajo de descompactadores. Tal vez, uno de los aportes más importantes se encuentra en relación a los patrones de roturación, vinculados a lo que se ha denominado "profundidad crítica". Al respecto, Spoor and Godwin, (1978), empleando diferentes modelos de órganos activos y dos profundidades de trabajo, hallaron que a la menor profundidad el patrón de roturación del suelo era similar para todos los modelos, diseños, pero diferían a la mayor profundidad .

Dicha forma de fracturamiento se encontraba con frecuencia para un amplio rango de texturas, contenidos de humedad y densidades. A niveles superficiales, el suelo era desplazado hacia adelante, arriba y lateralmente, bajo un patrón de roturación denominado fracturamiento o falla creciente, rompiéndose a lo largo de planos bien definidos que se propagaban desde el extremo de la reja hacia la superficie con una angulación aproximada a los 45º con respecto a la horizontal.

El modelo de ruptura continuaba con el incremento de la profundidad, hasta que a un determinado nivel, denominado **profundidad crítica**, el suelo comenzaba a deslizarse solamente hacia adelante y los lados (fracturamiento lateral), generando compactación
en profundidad, la cual dependía de la geometría de la reja. Sus observaciones a campo dieron por resultado que la profundidad crítica para órganos activos de 65 mm de ancho se producía en un rango de entre 300 y 400 mm, es decir, a relaciones profundidad/ancho de 5 a 7, alcanzando niveles más superficiales en la medida que el suelo se torna mas plástico o los horizontes superficiales más secos. Concluyeron, caracterizando a la profundidad crítica como aquella a la cual se produce compactación más que una efectiva remoción del suelo (Figura 63).

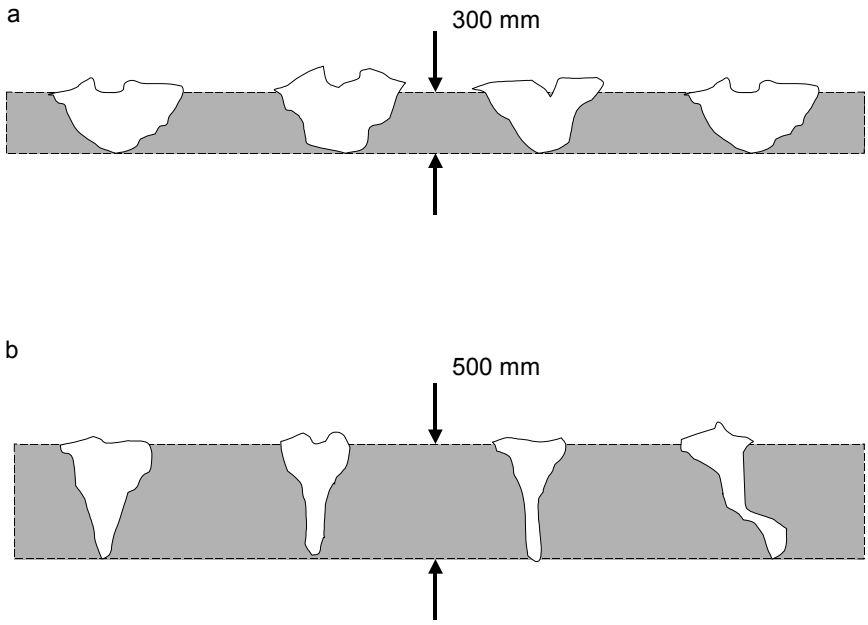


Figura 63. Patrones de roturación de diferentes órganos activos, trabajando a dos profundidades: a) 300 mm; b) 500 mm. (Adaptado de Spoor y Godwin, 1978).

Godwin and Spoor (1977) puntualizaron que para lograr una roturación efectiva del suelo se debe producir fracturamiento creciente y, por lo tanto, la profundidad crítica tenía influencia sobre la máxima profundidad a la que podría ser empleada una determinada reja. Dicho fracturamiento ocurría cuando la resistencia al corte en sentido vertical era menor que la lateral, igualándose ambas a la profundidad crítica. Spoor and Fry (1983) encontraron que la naturaleza del tipo de fracturamiento depende principalmente del grado de compresibilidad del suelo y de la magnitud de sus tensiones internas.

Sobre la misma temática, Mouazen and Neményi (1999), detectaron que por delante del arco se producía una elevación del suelo en forma de cuña. Por encima de la reja el suelo se desplazaba hacia arriba, hacia adelante y en forma lateral, iniciándose la elevación a partir del extremo de la reja, determinando un incremento de volumen de la totalidad del suelo por delante del escarificador. En virtud de los resultados observados, el arco tendría un rol importante en el efecto final de la herramienta sobre el suelo. Lo expuesto, indica que existe una clara dependencia entre los factores enumerados: ancho del órgano activo, profundidad de trabajo, estado del suelo. Resultados de investigaciones previas permitían inferir algunos de estos aspectos, pese a que no se había logrado, a partir de los resultados de los mismos, explicar los procesos. Las relaciones establecidas por los distintos autores determinan que la simple decisión de realizar un trabajo de escarificación y más aún de descompactación obliga a realizar un proceso de análisis, que pocas veces se efectúa a nivel de producción, que requiere al menos contestar los siguientes cuestionamientos:

1) ¿El estado del suelo es el adecuado para efectuar un trabajo de roturación en profundidad?

2) ¿Las características de diseño del órgano activo y del montante que lo soporta permitirán realizar un trabajo de roturación efectiva del suelo (bajo el patrón de fallas crecientes), garantizando el fracturamiento de las capas compactadas?

La primera pregunta implica que se debe valorar el estado del suelo a través de una mínima calicata y observar la condición del suelo por debajo de la capa

compactada que se quiere roturar. En acuerdo con los resultados experimentales, el suelo debe estar seco o poco húmedo en profundidad, de forma tal que las fallas crecientes abarque una porción importante de la zona compactada, sin generar problemas por superar la profundidad crítica y provocar compactación en profundidad por desplazamiento lateral del suelo.

La segunda cuestión debe tenerse en cuenta al momento de seleccionar, comprar el implemento o contratar su uso. Sin embargo, las alternativas de anchos de la reja en los escarificadores están bastante acotadas entre los 50 y 100 mm entre los distintos descompactadores y generalmente entre 50 y 80 mm. Los mayores anchos permitirán a las rejas de diseño convencional trabajos más profundos sin modificar el patrón de roturación pero incrementarán los esfuerzos de tracción en forma importante, limitando las posibilidades de conformación armónica de conjuntos tractor-apero.

Los descompactadores de arcos rígidos presentan habitualmente posibilidades de modificación o selección del ángulo de ataque, quedando a criterio de los usuarios, la responsabilidad de la selección. La variación de la posición se alcanza en muchos diseños a través de la ubicación del montante sobre la pieza que lo une al bastidor, en forma discontinua, por el perno que cumple las funciones de fusible de seguridad ante incrementos importantes del esfuerzo de tracción. Los ángulos de ataque de la reja se encuentran en el orden de 30º a 50º. Se podrá, en acuerdo con la decisión tomada trabajar con los menores ángulos, produciendo mayores efectos laterales y hacia delante, con bajos esfuerzos de tracción, con menor resistencia específica y roturación en agregados de mayor tamaño. En contraposición, los mayores ángulos de ataque provocarán efectos contrarios a los enunciados. Cabría preguntarse, cuales serían los beneficios efectivos de la mayor roturación del terreno, es decir, de alcanzar un tamaño de agregados menor en una labor de descompactación, tanto en condiciones de sistemas de labranza convencional como de siembra directa. Al respecto, deben relacionarse no solamente los aspectos energéticos sino también las consecuencias que dicha decisión tiene sobre la persistencia de los efectos de la descompactación, sobre las propiedades físicas del suelo, tal como será analizado posteriormente. No obstante ello, es importante que exista sobre el implemento la posibilidad de variar el ángulo de ataque de los órganos activos, ya que dicha regulación permitirá contar con una máquina más versátil. La versatilidad en las máquinas agrícolas es uno de los aspectos de mayor relevancia, al poder con una misma estructura básica cumplir con diferentes objetivos de labor y adecuar los requerimientos energéticos dentro de rangos relativamente estrechos para cada tipo de reja y conformación de conjunto

Influencia del ángulo de ataque

Payne and Tanner (1959), trabajando con una amplia gama de ángulos de ataque (definiendo como tal al formado por la inclinación de la reja con respecto a la horizontal en la dirección de avance), encontraron que con valores de hasta 45º el suelo provee una componente vertical que contribuye a la penetración de los órganos activos, cuyo sentido se invierte para mayores angulaciones. Asimismo, detectaron significativas variaciones en la eficiencia, medida en función del esfuerzo traccional por unidad de área de suelo removida, la cual resultó ser 8 veces mayor para ángulos de 20º con respecto a 160º. En cuanto al esfuerzo de tracción, este se mantenía relativamente constante para ángulos de entre 20º y 50º, incrementándose significativamente para mayores angulaciones.

Spoor and Godwin (1978) puntualizan que a profundidad constante, el suelo se fractura hacia arriba con escasa compactación (bajo el modelo de falla creciente), con ángulos de 25º, produciéndose compactación con valores de 70º.

Si bien los principios de roturación del suelo para implementos de montantes flexibles y rígidos son los mismos, estos últimos, al no experimentar variaciones en el ángulo de ataque, resultan energéticamente más eficientes. debido a los menores valores de resistencia específica obtenidos, según Claverie *et al* (1995), quienes encuentran además que los rangos de variación en la resistencia específica para los arcos flexibles resultan de mayor magnitud que para los arcos rígidos. Ensayos de tracción de arcos flexibles realizados por Claverie (1997) permitieron determinar que cuando la tracción ejercida sobre un arco flexible igualaba a los valores medios medidos en ensayos de campo, los ángulos de ataque inicialmente de 45º alcanzaban valores de 60° a 65°, los cuales se encontraban por encima de los citados por Payne and Tanner (1959) como determinantes de la mayor eficiencia energética y muy próximos a los mencionados por Spoor and Godwin (1978) como limitantes del patrón de roturación en fallas crecientes. En relación a los esfuerzos de tracción, a profundidad constante, resultaron significativamente menores para los arcos rígidos, con valores de 3600 N, comparativamente a los arcos flexibles, que alcanzaron 4200 N

Ayala *et al* (1996) evaluaron arcos rígidos y flexibles registrando una disminución del 27% en el coeficiente de labranza de arcos rígidos respecto de arcos flexibles. Balbuena *et al* (1997) en ensayos con escarificadores de arcos rígidos con interacción, realizados en dos suelos Argiudoles de la región Pampeana, evaluaron los efectos de diferentes ángulos de ataque de la reja sobre los parámetros de prestación energética. La resistencia específica al laboreo resultó siempre mayor para el ángulo de 45º, con respecto a los de 38º y 32º, alcanzando diferencias significativas con respecto al menor ángulo en cada uno de los ensayos realizados. Por otra parte, el área trabajada resultó también significativamente mayor para el menor ángulo ensayado en los diferentes suelos (32º y 38). Estos resultados son básicamente coincidentes con los alcanzados por Payne and Tanner (1959). El plano de roturación lateral no mostró diferencias a nivel estadístico pese a que se mantuvo una tendencia similar, correspondiendo la menor angulación del plano de falla al mayor ángulo de ataque de la reja. Al realizar cálculos del área roturada por los distintos tratamientos en función de la profundidad de trabajo, se alcanza una adecuada correlación entre las áreas medidas y calculadas (suponiendo un ángulo de fracturamiento teórico de 45º) para los tratamientos de 32º y 38º. Para el ángulo de 45º en cambio el área de suelo movilizada resultó un 22,26% menor. Esto indicaría la existencia de una modificación en la forma de roturación del suelo que produciría el incremento manifestado en los cálculos de resistencia específica al laboreo, asociada al predominio de las fallas crecientes por sobre las fallas horizontales para la menor angulación y , al menos, una reducción de las mismas en profundidad, pese a que la misma no superó en promedio los 220 mm, por debajo de los límites mencionados de 5 a 7 veces el ancho de labor del implemento utilizado (50 mm) para superar la profundidad crítica. El incremento de la resistencia específica podría en parte deberse también, tal como lo expresa Mckyes (1989), al aumento de la roturación del suelo dentro de la zona trabajada (frente de labor) por el órgano activo para el mayor ángulo de ataque.

Tal como se desprende del análisis de los resultados de los distintos trabajos de investigación, el trabajo con arcos flexibles no resultaría adecuado para la realización de trabajos de descompactación. El ángulo de ataque de la reja es un factor determinante, tanto de la capacidad de penetración del implemento, como en los aspectos relacionados a la energía requerida para la labor, incidiendo además sobre la profundidad crítica y el grado de roturación. En condiciones en las cuales el esfuerzo de tracción es elevado, como en todo proceso de descompactación profunda del suelo, los arcos o montantes flexibles se deformarán, incrementando el ángulo de ataque de la reja, aumentando los esfuerzos de tracción, hasta el momento en que la pérdida de la capacidad de penetración por disminución de las componentes en el plano vertical

determina reducciones en la profundidad de labor y el esfuerzo de tracción. El proceso, de esta forma, se transforma en cíclico, ocasionando no solamente ineficiencia energética sino irregularidad y en el trabajo del suelo y los efectos de roturación alcanzados.

c) bastidor

El bastidor, es la estructura sobre la cual se montan los arcos. Consta de una serie de largueros transversales llamados "paños" o "planos", generalmente en número de dos, tres o cuatro, en los que se distribuyen dichos arcos alternándolos de tal forma que proyectados sobre un plano perpendicular a la dirección de avance se encuentren todos ellos con igual distancia entre sí, denominada habitualmente distancia entre líneas de acción (Figura 64). Los largueros transversales determinan planos de acción o trabajo de los escarificadores, que establecen una secuencia de laboreo sobre el terreno, determinando a su vez que existan órganos activos que trabajan con distintos grados de interacción. El hecho de colocarlos en diferentes planos radica en que el apero ha de poder realizar una labor uniforme con la posibilidad de que no se produzcan atascamientos con el rastrojo. Generalmente los bastidores son rectangulares actuando como paños los lados de mayor longitud. La distancia entre paños oscila entre 0,50 y 1,20 m. La separación entre arcos depende del número de paños, ancho de la herramienta, profundidad máxima de trabajo y la masa y volumen de residuos presentes en la superficie.

Figura 64. Vista posterior del escarificador, separación entre arcos y planos de acción

Regulación de la distancia entre arcos

La distancia entre arcos será un factor más a regular, ya que la misma variará, entre otros en función de la velocidad de trabajo, la profundidad de labor, el tipo y estado del terreno y la cantidad de rastrojo presente. En líneas generales puede decirse que la distancia entre arcos deberá disminuirse cuanto menor sea la

profundidad de trabajo y podrá aumentarse cuando se trabaje a mayores profundidades. Sin embargo, la disminución de la distancia entre arcos se ve limitada por la calidad de rastrojo presente y la posibilidad de atorarse con el mismo. Desde el punto de vista energético, los procesos denominados de interacción entre órganos activos favorecen una clara disminución de la resistencia específica al laboreo (esfuerzo de tracción / área roturada)

Procesos de interacción

Los escarificadores, cualquiera sea su diseño constructivo básico y objetivos de labranza que alcanzan los mismos, se diferencian de las otras máquinas usadas para labranza en los procesos de interacción desarrollados entre los órganos activos. Estos procesos, por lo tanto, también ocurren en los descompactadores del tipo de montantes rígidos, rectos o angulados. Esta característica diferencial surge de la forma de roturación, es decir de los patrones de trabajo de los distintos órganos activos, principalmente a partir de los efectos producidos bajo el sistema de fallas crecientes. Una manera de definir en forma sencilla el concepto es identificar el predominio de los efectos laterales al órgano activo, en relación al área de suelo directamente en contacto con la reja del apero. De su comprensión dependerá la correcta selección y preparación del implemento para la realización de la labor, como así también la eficiencia de roturación de la capa compactada y la energía requerida para la realización de la labor.

Con referencia al trabajo desarrollado por órganos activos adyacentes, Willat and Willis (1965) mencionaron que cuando dos de ellos operan con un determinado distanciamiento entre sus rectas de acción, los perfiles de roturación que producen pueden superponerse, existiendo dos condiciones limitantes: cuando el distanciamiento es lo suficientemente reducido como para producir un perfil de trabajo plano en profundidad, y, por otra parte, cuando el mismo alcanza una magnitud tal que se forman perfiles de trabajo independientes, designando con el nombre de interacción a la situación intermedia de superposición de los perfiles trabajados. Un distanciamiento de 305 mm (12 pulgadas) podía provocar un camellón sin disturbar entre órganos adyacentes de una altura igual a tres cuartas partes de la profundidad de labor, tornando imprescindible realizar un segundo pasaje para lograr una adecuada roturación y mencionando como adecuado un distanciamiento de 228.6 mm (9 pulgadas), que si bien podría provocar un incremento en el esfuerzo traccional, debido a la necesidad de mayor cantidad de órganos activos para un determinado ancho de trabajo, eliminaría la necesidad de una segunda labor.

De las situaciones descriptas existen dos que se verifican en la mayoría de los escarificadores: En los planos de acción delanteros de los mismos, la distancia entre órganos activos adyacentes en un mismo plano implica que el trabajo lo realicen sin interacción, en forma aislada o individual. En los planos de acción posteriores, los órganos activos trabajarán el suelo entre las líneas de acción de las rejas delanteras, con interacción, o sea con superposición entre los perfiles trabajados por las rejas traseras con las líneas adyacentes delanteras (Fig. 65).

Sobre la misma temática, Soomro *et al* (1982), señalaron que cuando dos órganos activos trabajan a una determinada distancia, la interferencia de uno sobre los límites de trabajo del otro provoca un considerable cambio en los requerimientos energéticos de ambos y tiene influencia sobre la disturbación de suelo resultante. Determinaron, además, que dos rejas operando con interacción a la misma profundidad producen una mayor disturbación del suelo que trabajando en forma aislada, con una reducción del esfuerzo de tracción.

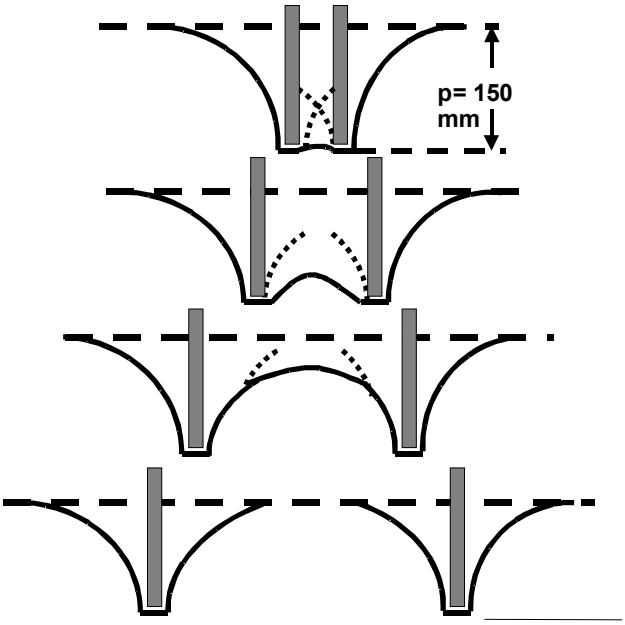


Figura 65. Proceso de interacción, a profundidad constante, para diferentes distanciamientos entre órganos activos. (Adaptado de Soomro et al, 1982)

De acuerdo a estos autores, el esfuerzo de dos rejas interdependientes es función de la distancia entre ellas y la profundidad de trabajo (Figura 66). El mínimo esfuerzo se encuentra cuando la distancia es igual a 0.34 veces la profundidad, siendo el esfuerzo un 10% mayor que para una única reja. El esfuerzo se torna máximo para distancias de 0.043 veces la profundidad (extremadamente cercanas), y para distanciamientos equivalentes a 2.5 veces la profundidad, cuando trabajan independientemente. Concluyeron que las rejas interactuando con un espaciamiento de 1 a 1.5 veces la profundidad de trabajo producen una gran remoción de suelo con un menor esfuerzo con respecto a rejas sin interacción.

Ensayos llevados a cabo por Godwin *et al* (1984) arrojaron como resultado valores mínimos de resistencia específica y uniformidad en el laboreo con espaciamientos entre órganos activos del orden de 1.4+/□ 25% veces la profundidad de trabajo

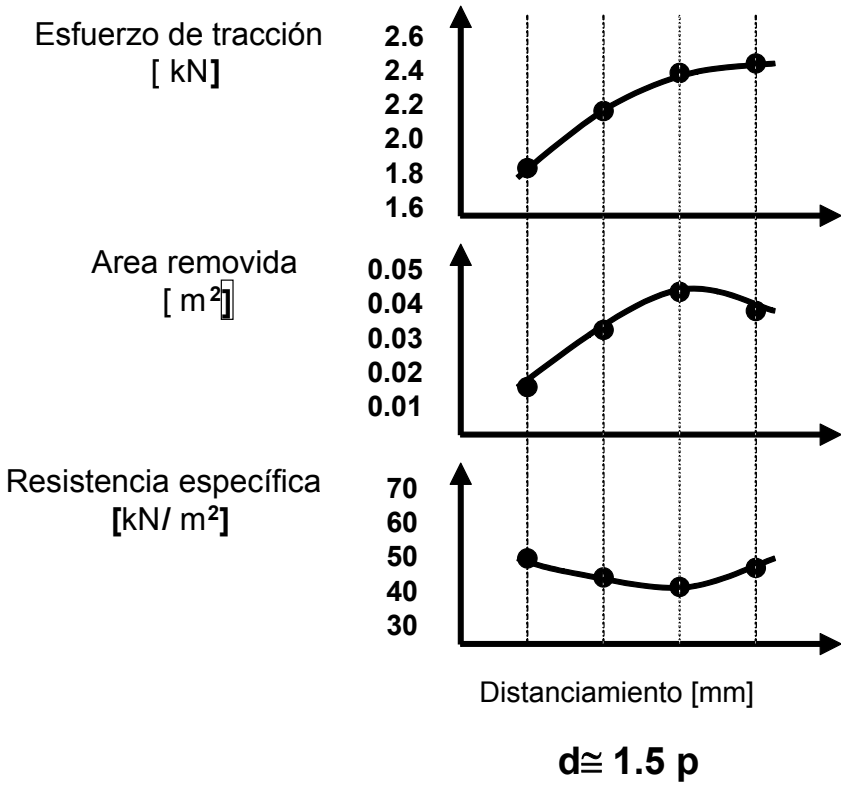


Figura 66. Relación entre esfuerzo de tracción y area removida en función del distanciamiento entre órganos activos. (Adaptado de Godwin et al., 1984)

Si bien los límites de distanciamiento, entre líneas de acción de las rejas, encontrados por estos autores, entre 1,05 y 1,75 parecen amplios, los valores medios de 1,4 a 1,5 veces la profundidad de labor son altamente consistentes, en acuerdo con resultados obtenidos en numerosos ensayos experimentales realizados en canales edafométricos y en campo. En este sentido, Benez *et al* (1991), en trabajos con subsoladores, informaron que las relaciones distanciamiento entre arcos/profundidad de trabajo y profundidad de trabajo/ancho de reja con mejor desempeño en cuanto a ancho de labor y área de suelo removida se hallaban en valores de 1.5 y 6.35, respectivamente.

Dinámica del conjunto tractor-escarificador

Las características de la producción agropecuaria en la República Argentina, en forma extensiva, sobre grandes superficies, ha generalizado el uso de equipos de arrastre en la mayoría de los sistemas de producción de granos y carnes de la región central del país. Esto determina que su utilización requiera por parte de técnicos y usuarios una esmerada selección y preparación para optimizar el rendimiento de tracción de los conjuntos tractor apero, especialmente durante las labores de labranza del suelo. En las producciones intensivas en cambio, predominan los equipos pequeños, de no más de 5 órganos activos, montados, vinculados al sistema de 3 puntos del tractor.

Es conocido, que los equipos de tracción libre, resultan los menos eficientes en lo referente a la magnitud de la carga vertical y a la transferencia dinámica de peso, mientras que los equipos integrales o montados sobre el tractor brindan los máximos beneficios, resultando los aperos semimontados, intermedios entre los mencionados anteriormente. Al respecto, Zoz (1972) estima el coeficiente de transferencia para

equipos de arrastre en un 25% del esfuerzo traccional, siendo del 45 % y 65% para los equipos semimontados y montados respectivamente, en forma independiente del apero utilizado, su diseño y enganche. Esta transferencia de cargas hacia el rodado de tracción adquiere mayor relevancia en los equipos de tracción simple (2WD) que en los tractores con asistencia de tracción en el eje delantero (FWA) o doble tracción de ruedas iguales (4WD). Sobre los diseños 2WD, Zhang y Chancellor (1989), concluyeron que podía alcanzarse una mejora potencial del 20% en el rendimiento del tractor cuando el peso sobre el eje delantero se reduce del 30% al 13% (por efecto de la transferencia antero - posterior de peso).

Balbuena y Terminiello (1993), trabajaron con escarificadores de cinceles de arcos flexibles de tracción libre, determinando coeficientes de transferencia dinámica del orden de 0,42 a 0,58, para distintas profundidades de labor. Concluyeron que los mismos se comportan dinámicamente como equipos semimontados. Kepner, Bainer y Barger (1982), demuestran que las cargas dinámicas sobre el rodado de tracción pueden ser incrementadas en los implementos de un solo eje de ruedas en la medida que las mismas se desplacen hacia atrás, por la modificación de la pendiente resultante de las fuerzas que actúan sobre el implemento.

La carga vertical obtenida en el trabajo con escarificadores montados, alcanzaría valores cercanos a los mencionados anteriormente, en la medida que se trabaje con las ruedas apoyadas sobre el suelo en forma permanente. Sería recomendable, en la medida de lo posible, no apoyar las ruedas y trabajar con esfuerzo controlado, incrementando la transferencia dinámica sin comprometer al motor. En caso de amplias variaciones del esfuerzo de tiro que produzcan que la profundidad de trabajo resulte demasiado desuniforme, se deberá pasar a la forma de trabajo de posición flotante, con las ruedas apoyadas. Solamente en terrenos muy uniformes en resistencia específica podrá intentarse trabajar en control de posición o control de carga con la mínima sensibilidad

Controles a realizar en forma previa a la labor

Equidistancia entre arcos

Se deberá medir con un metro la distancia entre los arcos del cincel sobre el bastidor del equipo, modificando la posición de los mismos cuando existan diferencias en las determinaciones entre los arcos, para que se pueda realizar una labor homogénea con una adecuada superposición de los triángulos de ruptura, que permita disminuir el esfuerzo de tracción.

Control de la curvatura de los arcos

Se deberá tender una soga entre los arcos extremos del cincel que se encuentren en cada línea (en vista lateral) y se procederá a desplazarla de arriba hacia abajo siguiendo la curvatura de los arcos. Muchas veces los arcos tienden a deformarse (peinarse) dirigiéndose hacia atrás, lo cual tornará al cincel más inestable y algunas veces más pesado al tiro. Habitualmente, los arcos que se ubican en el primer plano de acción, trabajando sin interacción con otros órganos activos adyacentes o delanteros, serán los que se encuentran sometidos a los mayores esfuerzos y, por lo tanto, a la mayor deformación. Puesto que no resulta común a nivel de campo contar con elementos que permitan la determinación del ángulo de ataque de la reja, es al menos recomendable verificar su estado en relación con otros arcos que hipotéticamente presentan menor deformación. Generalmente, el arco central del último plano de acción es el que ha trabajado la totalidad de las horas de uso con

interacción de arcos delanteros adyacentes. Por ello, las deformaciones deberían ser las menores y la curvatura cercana a la original, puesto que ha estado sometida a menores esfuerzos de tracción. En equipos con arcos rígidos se deberá controlar que la posición de los montantes en su vínculo a la pieza de sujeción sea la misma para todos, dada la posibilidad de variación del ángulo de ataque de las rejas que por lo general presentan

Control de las puntas de reja

Deberá controlarse el estado de las puntas de las rejas o púas e Invertirías o reponerlas cuando el desgaste sea excesivo ya que se dificultará la penetración sobre suelos secos y duros.

Nivelación del equipo

El equipo trabajará correctamente cuando en vista lateral el bastidor (una vez clavado el cincel y desplazándose) se halla perfectamente paralelo a la superficie del terreno, con lo cual nos aseguramos que todas las púas trabajen aproximadamente a la misma profundidad. De no ser así, y el equipo se halle más clavado de adelante o de atrás, se corregirá actuando sobre el sistema de enganche de distinta forma según cual sea éste.

Equipos de arrastre

Sistema de enganche discontinuo tipo lanza

Para lograr la correcta nivelación del cincel se actuará sobre la planchuela vertical perforada que se encuentra en la parte delantera del sistema de enganche, esta nivelación debe realizarse una vez que se halla regulado la profundidad de trabajo.

Sistema de enganche de regulación continua tipo lanza articulada

En este sistema para lograr la correcta nivelación del equipo se actúa sobre un torno, por lo cual la regulación es totalmente continua, facilitando a su vez el enganche del equipo al tractor.

Equipos montados

En estos equipos se nivelará en el plano transversal a la dirección de avance por medio de la regulación del o de los brazos elevadores derecho e izquierdo. En el plano longitudinal paralelo a la dirección de avance, la nivelación se hará por medio del 3º punto o brazo superior, acortando o alargando el mismo según corresponda.

Descompactación sub-superficial

En los suelos bajo producción existen diversos procesos que se presentan como factores atenuantes de los efectos de la compactación. Entre los mismos se mencionan procesos de autoestructuración del perfil, tales como ciclos de humectación-desecación, congelamiento- descongelamiento, actividad biológica, generación de poros por acción de las raíces. A ellos, se suman las estrategias de rotación de

cultivos, incorporación de materia orgánica, la planificación de las labores mecanizadas y el uso de descompactadores,. Algunos de los factores "naturales" no se presentan en muchas regiones, por lo que en esas situaciones, de existir problemas de compactación, la descompactación mecánica, se constituye en una de las principales alternativas.

Las características inherentes a la labor de descompactación a nivel subsuperficial, han determinado que la totalidad de los implementos utilizados estén equipados con arcos rígidos. Los equipos destinados a la descompactación de suelos pueden clasificarse en implementos con montantes rectos e implementos con montantes inclinados. Los primeros reciben la denominación de subsoladores. Aquellos de montantes inclinados se los conocen, generalmente, por la marca o nombre comercial de mayor difusión. Por ejemplo, los de montantes inclinados de lámina recta se denominan vulgarmente paraplow y paratill, mientras que los de lámina curva se los reconoce como cultivie, ecoltier, siendo todas ellas marcas registradas. Últimamente, se ha generalizado para la mayoría de ellos la identificación de los mismos como "paratill"

De manera similar a lo antedicho para los escarificadores de arcos flexibles, los descompactadores son máquinas agrícolas de sencilla construcción y operación. Sus órganos activos son de formas simples que habitualmente presentan simetría lateral o, en caso contrario, se disponen de forma tal que el conjunto de órganos activos presentan simetría en su configuración, lo que implica que no se generen componentes laterales sobre el implemento que dificulten el desplazamiento rectilíneo del mismo. Estos aspectos resultan en una facilidad de regulación y trabajo que es reconocida a nivel técnico y productivo. Pese a ello, los principios de trabajo y roturación del suelo de los escarificadores que deben usarse en procesos de descompactación de suelos no son habitualmente conocidos o comprendidos. Esto conlleva no solamente la posibilidad de realizar un trabajo ineficiente desde el punto de vista energético, sino también que la labor no genere los efectos agronómicos buscados. En el presente capítulo serán abordados los principales aspectos concernientes a las características del trabajo con descompactadores.

Energía requerida

La calificación de las labranzas ha sido un aspecto problemático que hasta el presente no ha tenido resolución. Resulta difícil acordar sobre una problemática que conlleva tantas calificaciones y opiniones como objetivos diferentes se busquen a través de las mismas. Sin embargo, en algunos aspectos parciales vinculados a la prestación tractiva de distintos diseños de implementos agrícolas, ha existido un amplio consenso entre los distintos grupos de investigación en Ingeniería Rural. Chisholm *et al* (1970) definieron a un sistema de labranza eficiente como aquél que minimiza la energía requerida para el laboreo, cuantificada a través de la resistencia específica. Es decir, un sistema de labranza o una máquina en particular será tanto más eficiente cuanto menor sea el esfuerzo de tracción requerido para trabajar cada unidad de área de suelo. Prácticamente la totalidad de los investigadores que desarrollan trabajos experimentales con distintos diseños de máquinas agrícolas, incluyen determinaciones de esfuerzo de tracción (componente en el plano horizontal del esfuerzo traccional total del apero), por medio de dinamómetros de tracción, área de suelo removida (frente de labor, perpendicular a la dirección de avance del implemento de labranza), obteniendo la resistencia específica como cociente de ambos valores. Si bien en aperos como los arados de reja y vertedera la determinación del área es sencilla, en el caso de los escarificadores resulta de mayor complejidad: Los planos de fractura son irregulares, la labor no es homogénea en profundidad y la zona de interacción, forma y

altura del lomo entre 2 líneas de trabajo contiguas dependerá de las relaciones profundidad/ ancho de la reja, distancia entre los órganos activos y estado del terreno, entre los principales factores. La metodología más utilizada a nivel experimental es la remoción manual del suelo trabajado y el cálculo del área a partir de los datos medidos por medio de un perfilómetro que abarque el ancho de labor del apero o por medio de algún proceso de automatización de las lecturas de profundidad de trabajo, una vez removido el suelo labrado. Balbuena *et al* (1994) determinaron que el grado de interacción puede ser valorado a través de la resistencia específica al laboreo, encontrándose ambos parámetros en relación inversa. En tal sentido, Balbuena *et al* (1996) hallaron que el trabajo con escarificadores en dos pasajes incrementaba los valores de resistencia específica y potencia insumida, concluyendo que la labranza en un solo pasaje resultaba energéticamente más eficiente. En este contexto, el objetivo de aumentar la eficiencia de la labor ha conducido al estudio del efecto del trabajo de implementos cuyos órganos activos se disponen en estratos crecientes de profundidad. Soomro *et al* (1982) citan que el laboreo en dos estratos permite reducciones del 50% del esfuerzo de tracción en comparación con la misma labor efectuada a la misma profundidad con una configuración convencional.

Spoor and Godwin (1978) concluyen que el empleo de órganos activos trabajando en forma superficial por delante de rejas más profundas determinaba incrementos en el área removida y disminución de la resistencia específica. Resultados similares fueron obtenidos por Balbuena *et al* (1992), en trabajos con rejas convencionales y de diseño alado. Adicionalmente Hamza and Anderson (2005), citan la consecuente reducción en el costo de la labor mediante un solo pasaje de implementos de cuatro estratos de profundidad. Es de importancia destacar que la mayor eficiencia no resulta únicamente de la disminución de la energía requerida para trabajar una cierta sección del terreno sino también sobre otros parámetros de la labor. Al disminuir la carga normal que ejercen las capas superiores del suelo sobre las inferiores, se reducen los riesgos de superar la profundidad crítica y por lo tanto, de generar compactación en profundidad. A su vez, al realizarse un único pasaje sobre el terreno se reduce el número de pasajes sobre el suelo, los riesgos de aumentar la compactación inducida por tránsito de vehículos, por el aumento del número de pasadas sobre un suelo que presenta lógicamente, mayores riesgos de compactabilidad. Al no realizar, con los implementos que trabajan en 2 estratos , una pasada luego del laboreo superficial para alcanzar la profundidad final de labor, se reducen las pérdidas de potencia variables, patinamiento y resistencia a la rodadura. Estas pérdidas de potencia suelen adquirir valores muy elevados en el segundo pasaje, puesto que el suelo ha disminuido sustancialmente su capacidad portante en los primeros 150 mm de profundidad, generando deformaciones en los planos horizontales y verticales al paso de las ruedas del tractor.

Figura 67. Una nueva generación de subsolador , en la cual cada plano de acción de dientes tiene una aumento gradual de la profundidad (0,10 m por plano) hasta llegar a la máxima profundidad (0,40 m en el último plano)

No obstante lo expuesto en los párrafos precedentes, debe tenerse en cuenta, independientemente de la mayor eficiencia, que los esfuerzos de tracción de cualquier alternativa de descompactación del perfil en un solo pasaje (ya sea en uno o dos estratos) serán muy altos. Esto implica que los costos de la labor serán elevados y que la conformación de equipos o conjuntos armónicos no resultará sencilla. En un análisis elemental de la problemática puede entenderse fácilmente que los mayores requerimientos tractivos implicarán al menos las siguientes consecuencias: 1) Será necesario contar con tractores pesados, en lo posible de alta relación peso/ potencia, para trabajar con valores de patinamiento bajos. 2) El tractor deberá vencer un elevado par resistente, por lo que se necesitará trabajar con motores que ofrezcan un elevado par nominal, potentes y seguramente en marchas de relativamente alta relación de transmisión, lo cual implica una baja velocidad de desplazamiento sobre el terreno. El hecho de conformar un equipo de descompactación en el cual el implemento cubra al menos en su labor la distancia entre caras externas del tractor, habitualmente genera esfuerzos de tracción que determinan la condición especificada en los puntos 1 y 2, por lo cual la capacidad de trabajo del conjunto será no muy elevada, tanto por la velocidad de trabajo como por el ancho de labor.

Características operativas

En el trabajo con escarificadores ha sido reiteradamente mencionada la dificultad para el desplazamiento sobre el suelo con restos vegetales en superficie debido al diseño de los montantes y la configuración espacial de los órganos activos. Esto implica una serie de características de diseño que resultan importantes tener en cuenta al momento de evaluar la prestación de los implementos, entre las cuales puede destacarse el despeje, la presencia de órganos de corte de residuos vegetales y

el número de planos de acción y distancia entre planos de acción de los órganos activos.

El **despeje** del implemento (distancia entre el extremo de la reja y el punto más bajo en la vinculación del montante al bastidor) adquiere importancia ya que cuanto, mayor sea, se incrementaran las posibilidades de evitar el atoramiento del equipo, determinando, además, su capacidad para el trabajo a mayores profundidades.

Las **cuchillas circulares** son empleadas para auxiliar en el corte vertical del suelo y para cortar los residuos vegetales, de manera de disminuir las posibilidades de atoraduras (Srivastava *et al*, 1994). De acuerdo a lo citado por Riley and Fielke (1990), el corte de los residuos producido por la cuchilla circular provoca la formación de un canal a través del cual el órgano activo puede desplazarse sin inconvenientes. La utilización de las mismas, en laboreo primario con cinceles, es aún poco difundida y generalmente ofrecida como equipamiento opcional en los equipos comerciales. Existen 2 diseños difundidos de ubicación de las cuchillas circulares en escarificadores: a) en forma individual, inmediatamente por delante de cada arco y b) en forma conjunta, en la parte anterior del bastidor, pudiendo el corte producido por cada cuchilla coincidir o no con la línea de acción de los arcos. La adaptación de cuchillas circulares en la parte frontal de los cinceles genera, por lo tanto, distintas configuraciones espaciales en relación a la ubicación relativa de la línea de trabajo de cuchillas y rejas. Fielke and O´Driscoll (1986) trabajando con cuchillas circulares por delante de rejas de 0,4 m de ancho concluyeron que la adición de aquellas favorecía el movimiento del suelo hacia los costados en detrimento de la elevación del mismo. Indicaron, además, la formación de un cuerpo de arcilla por delante de la reja, que no es desplazado de ese sitio debido al corte del terreno producido por las cuchillas cuando las mismas trabajaron en la línea de acción de las rejas, con una visible reducción de la remoción del suelo.

Balbuena *et al* (1996) realizaron una serie de ensayos que incluyeron la evaluación de montantes rígidos y flexibles interactuando con cuchillas trabajando sobre la línea de acción de las rejas y montantes rígidos con y sin interacción, colocando por delante de los mismos, en ambos ensayos, cuchillas circulares sobre y entre las líneas de acción de las rejas sobre el terreno. En cada serie tomaron como testigo el trabajo de arcos sin cuchillas circulares. Informaron que durante los ensayos fue posible visualizar que el corte producido por la cuchilla favorecía para el caso de la ubicación en la línea de trabajo del arco una mayor cobertura de rastrojo, al disminuir el entremezclado del mismo con el suelo. Atribuyeron este efecto a la disminución de la elevación del terreno sobre el arco durante el desplazamiento del conjunto, lo cual coincidiría en parte con lo reportado por Fielke and O`Driscoll (1986), para rejas de escardillo. Además, indicaron que fue también posible observar en el tratamiento con cuchillas sobre la línea de trabajo, la presencia sobre la reja del escarificador de un cuerpo de tierra que no se desprendía durante el proceso de elevación de los órganos activos. A su existencia, en forma permanente durante el trabajo del implemento, sería posible atribuir el mayor esfuerzo traccional con respecto al tratamiento con cuchillas entre las líneas de acción, pese a que la sección trabajada por este último haya sido superior. En relación al área trabajada, adjudicaron a la colocación de cuchillas sobre la línea la reducción significativa del frente de labor de dicho tratamiento con respecto a la ubicación entre las líneas de acción. Concluyeron que, el uso de cuchillas circulares incide sobre la energía requerida para la labranza del suelo con escarificadores de arcos rígidos y que la colocación de cuchillas circulares por delante y en la misma línea de acción de las rejas disminuye el área de suelo removida.

Terminiello *et al* (1997) arribaron a similares conclusiones afirmando que el uso de cuchillas circulares reduce los esfuerzos de tracción, y su ubicación relativa sobre arcos rígidos, incide sobre la resistencia específica.

En el conjunto de ensayos, con y sin interacción, puede visualizarse que los efectos de la colocación y ubicación de cuchillas circulares presentan variaciones según los órganos activos se encuentren interactuando o no, sin que ello implique un cambio de tendencias. En los trabajos sin interacción las diferencias entre tratamientos con cuchillas entre las líneas de acción y sobre las mismas son máximas, tanto en área removida como en resistencia específica. Esto implica, tal como resulta lógico esperar, que los procesos de interacción disminuyan el efecto de la adición de cuchillas y su ubicación, pero no los eliminan. Por el contrario, resulta también claro que ante la presencia de un importante volumen de residuos vegetales, la posición que en mayor medida favorece la capacidad de paso del conjunto será la colocación de las cuchillas por delante y coincidente su alineación con el órgano activo del escarificador. Si se atiende a las hipótesis ad-hoc enunciadas en los trabajos, surgen algunas recomendaciones de carácter general que podrían resumirse en los siguientes ítems: a) La colocación de cuchillas circulares resulta siempre conveniente, con respecto a su no inclusión, puesto que se mejoran aspectos operativos y de prestación tractiva del conjunto; b) podría deducirse que, en condiciones en las cuales la presencia de residuos resulta limitante, es conveniente colocar las cuchillas en la misma línea de trabajo de las rejas, pero aumentando el grado de interacción entre los órganos activos, acercándose a una relación distancia entre rejas/profundidad de labor menor a 1,4. De esta forma, se minimizarían tanto las dificultades de capacidad de paso, como así también los efectos negativos sobre la prestación tractiva; c) en condiciones de ausencia de residuos, sería conveniente colocar cuchillas circulares entre las líneas de trabajo de las rejas, lo cual mejora la prestación tractiva, principalmente por los efectos sobre los arcos que se disponen en los primeros planos de acción, sin interacción.

El número de planos de acción, mencionado en forma precedente implica la posibilidad que, respetando las relaciones entre profundidad de trabajo y distancia entre líneas de acción de los órganos activos indicadas por Soomro *et al* (1982), Godwin *et al* (1984) y Benez *et al* (1991) entre otros, permita distanciamientos entre órganos activos de un mismo plano, que no limiten la capacidad de paso del implemento.

Otras características de diseño de los descompactadores que resultan de importancia analizar son:

- Alternativas de rejas que pueden utilizarse
- Tipo de arco

El **tipo de reja** constituye un elemento de importancia para la adaptación de los descompactadores a diferentes condiciones del terreno. Spoor y Godwin (1978) trabajando sobre subsoladores, subsoladores alados (ver Fig. 58) y cinceles rígidos encuentran que la profundidad crítica puede alcanzar mayores valores en la medida que se adicionan alas a los órganos activos. Diversos trabajos afirman que la utilización de las alas acopladas al subsolador si bien incrementan el esfuerzo de tracción, producen una disminución en la resistencia específica al laboreo o coeficiente de labranza del implemento debido al importante incremento en el frente de labor.

Soomro *et al* (1982) concluyen que tanto la disposición, distanciamiento, profundidad y adición de alas influyen sobre el esfuerzo traccional, el área removida y la resistencia específica al laboreo. En relación con el uso de rejas aladas,

determinaron que el distanciamiento entre las líneas de acción de los arcos con el cual se alcanzaron los menores valores de resistencia específica, fue aproximadamente 2 veces la profundidad de labor. Balbuen *et al* (1992), encuentran también diferencias altamente significativas en el área trabajada por rejas de diseño alado, del tipo denominado comercialmente "pata de ganso" en comparación con rejas convencionales, a la vez que aquellas registraron los menores valores de resistencia específica.

Figura 68. Subsolador alado

En función de lo antedicho, técnicamente resultaría recomendable la utilización de rejas de diseño alado que, si bien demandan mayores esfuerzos tractivos, permiten incrementar la roturación en profundidad, a la vez que permiten aumentar la eficiencia de la labor desde el punto de vista energético. Por otra parte, posibilitan contar con una mayor oportunidad para la realización de la labranza, en la medida que se adecuan a trabajar con mayores tenores de humedad que las rejas convencionales. Pese a ello, hasta el presente no se han difundido mayormente en el mercado argentino descompactadores con rejas de diseño alado, a diferencia de lo ocurrido tanto en Estados Unidos como en Europa a partir de la última década del siglo XX. Estas diferencias en la adopción de las alternativas tecnológicas podrían explicarse a partir de un conjunto de factores técnicos, productivos y económicos. Por un lado, la problemática de los procesos de compactación y su incidencia en los sistemas productivos no ha sido visualizada con claridad. A su vez, en la década del noventa, la rápida evolución de la siembra directa de cultivos sin remoción previa del terreno, coincidió lógicamente con la disminución de los sistemas de labranza mínima o reducida con utilización de implementos de labranza vertical. La oferta, de alternativas tecnológicas de aperos para la descompactación también se redujo como consecuencia de estos cambios. Por otra parte, los diseños alados requieren que el fabricante dimensionen el conjunto montante-reja para los mayores esfuerzos requeridos, debiendo modificar para ello también la estructura del bastidor. En un contexto de reducción de ventas de equipos de labranza, necesidad de readecuación de los diseños existentes y de mantenimiento de altos niveles de cobertura del suelo, estas

alternativas encuentran todavía escasas posibilidades de adopción en el medio productivo.

En cuanto al tipo de montante utilizado en los descompactadores, pueden considerarse tradicionales o convencionales a los de montante recto, en relación a los de montante angulado (recto o curvado) en el plano transversal a la dirección de avance, conocidos como Paratill, Paraplow o Cultivie entre otras denominaciones técnicas y comerciales. En estos implementos, el trabajo sobre el suelo es realizado en parte por la reja que se encuentra sobre la zapata del subsolador y principalmente por la reja que se encuentra adosada sobre la lámina curva o recta angulada del montante.

Teniendo en cuenta las dimensiones de la reja adosada a la zapata, la misma tendría importancia en la penetración inicial del equipo, más que la roturación del suelo en profundidad. En virtud de las características diferenciales de los distintos diseños de descompactadores, variará la adecuación y aptitud de los implementos para su inclusión en diferentes sistemas de labranza. Pidgeon (1983) indicó que el Paraplow puede ser utilizado, como máquina de labranza, para extender los sistemas conservacionistas a suelos que son naturalmente inapropiados para técnicas de mínima y no labranza. Según Mallet y Lang (1987) el Paraplow provoca el desmenuzamiento del suelo, con una mínima alteración de la superficie del suelo. Tal como fuera indicado en el análisis de los patrones de roturación de los descompactadores, Spoor and Godwin (1978) determinaron que las características de roturación de los subsoladores de montantes inclinados, rectos, son similares a los de otros diseños de escarificador. Vinculado a estos conceptos, Casão Junior and Chang (1993), trabajaron con montantes inclinados a escala reducida, con 45º de ángulo lateral, estableciendo una adecuada relación entre las áreas medidas y las calculadas a partir de la propuesta de Willat and Willis (1965).

Con respecto a los requerimientos tractivos de estos implementos, se ha informado un requerimiento de 883 daN por arco, en trabajos a 0,4 m de profundidad y 7 km/h, sobre suelos francos (PAMI, 1991). Hilbert and Tesouro (2000) realizaron evaluaciones de la energía requerida para el trabajo con subsoladores de montantes curvos, las cuales arrojaron resultados similares a las evaluaciones realizadas sobre implementos angulados lateralmente de montantes rectos. Claverie *et al* (1998) realizaron ensayos de arcos de Paratill, evaluando 2 distanciamientos laterales, 0,35 y 0,45 m, para 2 montantes dispuestos en forma convergente, en un mismo plano de acción. Determinaron que los menores valores de resistencia específica se correspondieron con el mayor distanciamiento entre órganos activos, con una relación entre distancia entre rejas y profundidad de labor de 1,42. Sin embargo, la configuración espacial de los órganos activos, en los subsoladores de montantes angulados, varía en los implementos, tanto en la distancia entre las líneas de acción de las rejas, como así también en la simultaneidad y progresividad del proceso de interacción. Balbuena *et al* (2003) evaluaron distintas alternativas de configuración de subsoladores de montantes curvos angulados lateralmente sobre un suelo Argiudol típico. En concordancia con lo indicado por Godwin *et al* (1984) y Claverie *et al* (1998), la menor resistencia específica se correspondió con una relación distancia entre líneas de acción y profundidad del órgano activo de 1,528, cercana a los valores medios de 1,4 y 1,42 mencionados por los mismos respectivamente. Los autores concluyeron que la resistencia específica es independiente de la disposición de los montantes y variable en relación a la distancia entre los órganos activos. Sin embargo, los parámetros de prestación, esfuerzo de tracción y área de suelo removida, son afectados por la disposición y distanciamiento de los montantes y órganos activos.

El análisis de los resultados indica que el área trabajada es mayor para la disposición con arcos convergentes por pares, lo cual determina una mayor homogeneidad en la profundidad de labor. En correlación con el incremento del área

trabajada, los esfuerzos de tracción fueron también mayores para esta disposición en relación a los registrados cuando el proceso de interacción se genera por el trabajo de montantes ubicados por detrás de otro delantero y lateral con la misma disposición. En función de las perfilometrías realizadas, para la separación entre arcos que tuvo la menor resistencia específica, la altura del sector no trabajado entre las rejas alcanzó en promedio 0,10 m (28,57% de la profundidad de labor), mientras que para los arcos convergentes en conjunto, el sector de suelo no roturado llegó a una altura de 0,15 m (42,8% de la profundidad de las rejas). Esto podría configurar una limitación, en la medida que sea necesario por algún motivo, una remoción homogénea en profundidad y superior a los 0,20 m.

En un análisis general, los descompactadores de montante angulado producen una menor rugosidad de la superficie del suelo con respecto a otros implementos. A esta mayor o menor uniformidad, contribuye el ángulo lateral del montante, variable entre 30º, 45º y 60º con respecto a la superficie del terreno. Los mayores ángulos producirían menor remoción superficial, mientras que angulaciones de 45º y 30º favorecerían una mayor elevación de la cota del terreno y modificación de la posición de los agregados del suelo, que podría favorecer una mayor duración de los efectos de la labor.

Persistencia de la labor

La duración de los efectos de las labores de descompactación adquiere relevancia en relación con la energía requerida para la misma, los costos que conlleva y los menores o mayores beneficios generados, desde el punto de vista de las propiedades físicas del suelo como así también de los efectos sobre el rendimiento de los cultivos. Además, la persistencia de las condiciones de baja resistencia a la penetración, debidas a la labranza profunda, es relevante al momento de definir la frecuencia de este tipo de operación. Al respecto, los resultados y conclusiones producto de numerosos trabajos de investigación muestran una gran diversidad en los distintos aspectos enunciados. De ellos se desprende que los beneficios, de aflojamiento del perfil mediante el subsolado, dependen de la profundidad y magnitud de la disrupción y de la persistencia de la misma a lo largo de la estación de crecimiento del cultivo.

En este contexto, Raper (2005) menciona que el escarificado a profundidades excesivas, además de implicar un incremento en la energía necesaria para su realización, puede promover futuros problemas y a mayores profundidades, como consecuencia del tráfico posterior a la labranza.

CALIDAD DE AGUA DE RIEGO
TRATAMIENTO DE SUELOS AFECTADOS

Ing. Agr. Ricardo Andreau

El conocimiento de la calidad del agua de riego es fundamental para la elección del método de riego, su manejo y el cultivo a implantar. Vendrá determinada por las sales que se encuentra en ella, y dependerá de la naturaleza de éstas y de sus concentraciones.

El uso de aguas de riego salinas supone el riesgo de **salinizar** el suelo, provocando, en numerosos, casos disminución en la producción del cultivo (la capacidad de la planta para absorber el agua disminuye a medida que aumenta el contenido de sales, teniendo la planta que realizar un mayor esfuerzo). Este proceso ocasiona además, otros problemas como la **toxicidad** puesto que algunas sales cuando se acumulan en cantidad suficiente resultan tóxicas para los cultivos, u ocasionan desequilibrios en la absorción de los nutrientes. Si las sales están dominadas por sodio y la concentración de calcio es baja, (**sodicidad**) las partículas tienden a disgregarse y esto provoca una reducción de la velocidad de infiltración y permeabilidad en general, pudiendo, además, causar **obstrucciones** en los sistemas de riego localizado. (Ver capítulo Problemáticas de índole química en los suelos)

Mediante un análisis fiable del agua se pueden determinar las estrategias de riego que deben llevarse a cabo, según la salinidad del agua y la tolerancia de los cultivos a esta salinidad.

Salinidad

El agua de riego contiene determinadas sales que se añaden a las ya existentes en el suelo. Las sales que nos interesan son aquellas que, además de ser solubles, se descomponen en iones:

Cationes	**Aniones**
Calcio (Ca^{2+})	Cloruro (Cl^-)
Sodio (Na^+)	Sulfato (SO_4^{2-})
Magnesio (Mg^{2+})	Biocarbonato (CO_3H^-)
Potasio (K^+)	Carbonato (CO_3^{2-})

La salinidad del agua de riego se puede determinar por dos procedimientos:
a) Medida del contenido de sales: se realiza en laboratorio, evaporando en una estufa una muestra de agua y pesando el residuo sólido. Se suele expresar en miligramos por litro (mg/l) o en miliequivalentes por litro (meq/l).
b) *Medida de la conductividad eléctrica*: la concentración o el contenido total de sales se puede determinar midiendo la conductividad eléctrica. Esta se expresa en milimhos por centímetro (mmho/cm) o en deciSiemens por metro (dS/m); ambas expresiones tienen el mismo valor numérico.
El contenido de sales y la conductividad eléctrica están relacionadas mediante la ecuación:

$$C = 0.64 \times C$$

C = Contenido salino (g/l)
CE = Conductividad eléctrica (dS/m)

Calificación de la salinidad

Existen varios criterios que establecen si el agua puede usarse para el riego según la cantidad de sale disueltas en ella. La FAO (Organización para la Agricultura y Alimentación) indica el riesgo de salinización según los siguientes límites según los límites que se indican en la Tabla 54.

Tabla 54. Calificación de la salinidad del agua

Riesgo	Concentración(g/litro)	CE (dS/m)
Ninguno	< 0.45	< 0,7
Ligero a moderado	0.45 a 2	0.7 a 3
Alto, severo	> 2	> 3

Como puede observarse, si el contenido de sales es mayor de 2 g/L o la conductividad eléctrica mayor de 3 dS/m, los problemas de salinidad pueden ser muy graves, a menos que se establezcan una serie de tratamientos tales como el lavado de sales o el cambio del cultivo por otro que resista mejor las condiciones de salinidad.

Toxicidad

La presencia de determinadas sales en el suelo, incluso a bajas concentraciones, puede provocar efectos tóxicos en las plantas. El sodio, el boro y el cloruro son las que, en general, ocasionan mayores problemas para los cultivos:

- Un exceso de sodio produce sequedad o quemaduras en los bordes exteriores de las hojas
- El exceso de cloruro suele manifestarse con quemaduras en la punta de las hojas y avanzar por los bordes
- Los síntomas de toxicidad por boro suelen manifestarse por un amarilleamiento de la punta de las hojas más antiguas, que va desplazándose hasta el centro de las hojas entre los nervios y sequedad en algunas otras zonas de la planta

La solubilidad de las sales es un parámetro evaluador de su toxicidad para los cultivos. En la Tabla 55 se reproduce la máxima solubilidad de las sales para un suelo que esté sometido a una temperatura de 40°C

Tabla 55. Solubilidad máxima de sales a 40ºC.

	Solubilidad máxima		
	CE dS/m	g/l	meq/l
$MgSO_4$	363	262	4.352
Na_2SO_4	504	430	6.064
$CaSO_4$	2,5	2,04	30
NaCl	453	318	5.440
$MgCl_2$	618	353	7.413
Na_2CO_3	693	441	8.320
$NaCO_3H$	272	137	3.261
$CaCO_3$	0,8	0,01	10
$MgCO_3$	0,8	0,00	10

Todas las sales solubles pueden constituir soluciones con altísimos valores de CE. Sin embargo, el yeso utilizado en el tratamiento de suelos sodificados, tan solo puede dar soluciones con un máximo de 2,5 dS/m. Cuando en un suelo, el yeso es muy abundante, solo se encontrara disuelto 2,04 gr/l y el resto se encontrara precipitado, por lo que la solución nunca superará el valor de 2,5 dS/m. Para tratar los problemas de toxicidad se recurre a tratamientos similares a los indicados para la salinidad: lavado de sales, enmiendas de calcio si la toxicidad es debida al sodio o utilizar cultivos más tolerantes.

Problemas de infiltración

Cuando la velocidad de infiltración es muy baja, puede ocurrir que el agua infiltrada no baste para cubrir las necesidades del cultivo. Los problemas más frecuentes relacionados con una infiltración baja, suelen producirse cuando el sodio se incorpora al suelo y deteriora su estructura; los agregados del suelo se dispersan en partículas pequeñas que tapan o sellan los poros y evitan que el agua pueda circular e infiltrarse con facilidad. El efecto contrario lo producen el calcio y el magnesio, por lo que para evaluar realmente el problema que puede generar un exceso de sodio, hay que saber también la cantidad de estos últimos elementos que hay en el suelo. Es por ello que se ha establecido el índice RAS (Relación de adsorción de sodio) en el agua que será utilizada para riego, viene definido por la siguiente fórmula:

$$RAS = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

donde Na^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} representan, respectivamente, las concentraciones de los iones de sodio, calcio y magnesio del agua de riego, expresados en meq/l.

Así, a partir del RAS del agua de riego y de la salinidad podemos estimar la reducción de infiltración a partir de la Figura 69.

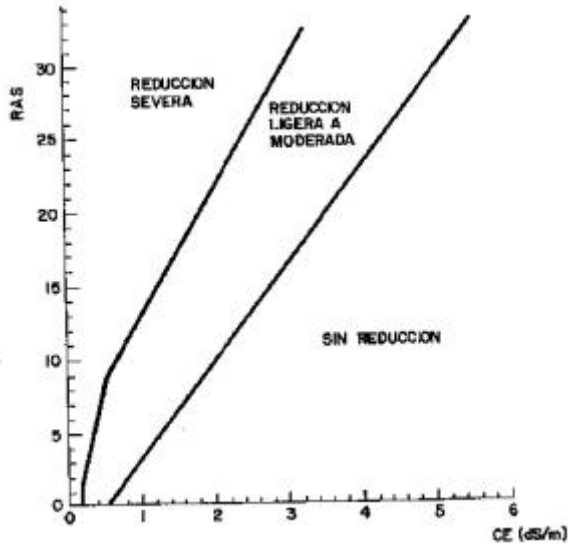


Figura 69. Problemática de la infiltración de acuerdo a la salinidad y sodicidad del agua de riego.

Riesgos de obstrucciones

Los sólidos en suspensión, las sustancias disueltas o los microorganismos contenidos en el agua de riego pueden producir obstrucciones en los emisores de riego localizado. En la Tabla 56 se señala el riesgo de obstrucción en función de diversos parámetros.

Tabla 56. Riesgo de obstrucciones en los emisores según algunas características químicas del agua de riego

	Riesgo de obstrucciones		
Elemento	**Ninguno**	**Moderado**	**Grave**
Sólidos en suspensión (mg/l)	<50	50-100	>100
Sólidos solubles (mg/l)	<500	500-2000	>2000
Manganeso (mg/l)	<0,1	0,1-1,5	>1,5
Hierro (mg/l)	<0,1	0,1-1,5	>1,5
Acido Sulfhídrico (mg/l)	<0,5	0,5-2	>2
pH	<7	7-8	>2

Muestreo del agua de riego para su análisis

El análisis de la calidad del agua requiere tomar una muestra representativa, para ello se seguirán las siguientes normas:

- El recipiente debe ser de vidrio o plástico de aproximadamente un litro de capacidad, se debe lavar varias veces el envase con la misma agua de riego
- La muestra debe ser tomada momentos antes de ser llevada al laboratorio, ya que los resultados serán tanto mejor cuanto menor sea el intervalo de tiempo transcurrido entre la toma de la muestra y el análisis
- En pozos dotados de bomba, debe tomarse la muestra después de algún tiempo de su puesta en marcha
- En ríos y embalses se recogen varias tomas en diferentes puntos representativos y se mezclan en una sola muestra. No debe tomarse en zonas estancadas, sino en lugares donde el agua esté en movimiento. En estos casos la muestra debe tomarse a una profundidad intermedia entre la superficie del agua y el fondo
- Las muestras deben mantenerse en una heladera a una temperatura de unos 5º C
- Hay que cerrar el envase y etiquetarlo
- Junto a la muestra debe acompañarse un informe indicando dónde ha sido tomada, para qué tipo de cultivo va a ser utilizada, características del suelo y cualquier otra información que pueda ser importante para determinar la calidad del agua

En la Tabla 57 se transcriben rangos de valores aceptables de agua de riego.

Tabla 57. Rangos orientativos de propiedades químicas del agua de riego considerados adecuados

Propiedad	Rango adecuado	
Conductividad eléctrica	0-3 dS/m	
RAS	0-15	
pH	6-8,5	
Dureza	0-40 Fº	
	meq/l	**mg/l**
Sólidos en disolución		0-2000
Calcio	0-20	0-400
Magnesio	0-5	0-60
Sodio	0-40	0-920
Carbonatos	0-0,1	0-3
Bicarbonatos	0-10	0-600
Cloruro	0-30	0-1100
Sulfatos	0-20	0-960
Potasio		0-2
Boro		0-2
Hierro		0-0.5

Interpretación de los resultados

A partir de los datos analíticos puede establecerse una clasificación del agua, por ejemplo a través de los criterios desarrollados por Ayers y Wescot (1987), cuyos parámetros se visualizan en la Tabla 58.

Tabla 58. Calificación de la calidad del agua para riego

Problemas potenciales de riego		Unidades	Grado de restricción en el uso		
			Ninguno	Bajo a moderado	Severo
Salinidad *(afecta la disponibilidad de agua)*[1]					
	CE	dS/m	< 0,7	0,7 – 3,0	> 3,0
	TDS	mg/l	< 450	450 – 2000	> 2000
Infiltracion *(afecta la tasa de infiltración del suelo. Evaluar usando CE y RAS juntos)*[2]					
RAS	0 – 3 **CE**		> 0,7	0,7 – 0,2	< 0,2
	3 – 6		> 1,2	1,2 – 0,3	< 0,3
	6 – 12		> 1,9	1,9 – 0,5	< 0,5
	12 – 20		> 2,9	2,9 – 1,3	< 1,3
	20 – 40		> 5,0	5,0 – 2,9	< 2,9
Toxicidad específica *(afecta cultivos sensibles)*					
	Sodio (Na)				
	Riego superficial	RAS	< 3	3 – 9	> 9
	Riego por aspersión	me/l	< 3	> 3	
	Cloruro (Cl)				
	Riego superficial	me/l	< 4	4 – 10	> 10
	Riego por aspersión	me/l	< 3	> 3	
	Boro (B)	mg/l	< 0,7	0,7 – 3,0	> 3,0
Otros Efectos *(afecta cultivos sensibles)*					
	Nitrógeno (NO_3^- - N)	mg/l	< 5	5 – 30	> 30
	Bicarbonato (HCO_3^-) (aspersión)	me/l	< 1,5	1,5 – 8,5	> 8,5
	pH		**Rango Normal 6.5 – 8.4**		

Adaptado de la Universidad de California Committee of Consultants 1974

1 CE= conductividad eléctrica del agua, en deciSiemens por metro a 25°C (dS/m) o en millimhos por centímetro (mmho/cm). TDS= total de sólidos disueltos, en milligramos por litro (mg/l).

2 RAS= relación de absorción sodio

Condiciones:

Rendimiento potencial: con ninguna restricción de uso se asume que los cultivos alcanzan su máxima capacidad de producción. La "restricción de uso" indica que puede ser una limitante y que algún manejo especial se necesite para alcanzar la máxima producción. La "restricción de uso" no quiere decir que el agua no pueda ser utilizada. El suelo debe poseer un buen drenaje interno.

Método y frecuencia de riego: Riego superficial o por aspersión. El riego no es frecuente y los cultivos utilizan 50% o mas del agua almacenada en el suelo antes del

próximo riego. La fracción de lavado es del 15% mínimo. No se debe utilizar esta clasificación en riego por goteo.

Tratamiento para suelos sódicos

En relación a los suelos sódicos, como se ha visto, la principal afectación ocurre a nivel de sus propiedades físicas y dicha afectación es una función de su concentración en relación a otras bases del suelo. Mientras que el Na^+ ejerce efectos dispersantes, en suelos ácidos, el Al^{3+} y el Fe^{3+}, y en suelos básicos a ligeramente ácidos, el Ca^{2+} y en menor medida el Mg^{2+}, cumplen roles estructurantes, al funcionar como puentes catiónicos entre los coloides del suelo.
De manera que el tratamiento de los suelos afectados por Na se realiza en 2 etapas:

1er etapa reemplazo del Na intercambiable hacia la solución del suelo
2º etapa lavado en profundidad del Na reemplazado

1er etapa puede llevarse a cabo de 3 maneras:

1.- Método biológico: el fundamento geoquímico de esta práctica es el ion Na se intercambia por H^+ producidos a partir del CO_2. El CO_2 es aportado por la respiración de microorganismos a partir de la descomposición de sustratos orgánicos o por la respiración de las raíces de plantas superiores. Ya que la actividad biológica en los bajos alcalinos es generalmente pobre por los aspectos ya comentados en puntos precedentes, por este método se busca intensificarla.

2.- Método químico: la propiedad del Ca^{2+} de reemplazar eficientemente al Na^+ intercambiable, favoreciendo la estructura es la que se persigue cuando se agrega yeso ($CaSO_4.2H_2O$) al suelo, produciéndose la reacción que se ilustra a continuación:

$$X - 2Na + CaSO_4 \rightleftarrows X - Ca + Na_2SO_4 \quad \text{(x: coloide intercambiador)}$$

Se trata de un producto natural y en algunos casos industrial, soluble y en general, de bajo costo. El reemplazo debe ser acompañado de posibilidades de percolación profunda del Na^+, por lo que las condiciones de drenaje deben ser tales que esto sea posible. En situaciones de deterioro grave de la estructura, la eficiencia del enyesado se reduce, drásticamente a consecuencia de la imposibilidad de eliminación del Na^+ intercambiado. En condiciones de cultivos intensivos, es común acompañar la práctica con drenes artificiales para favorecer este proceso.

La dosis utilizada varía con el PSI (Porcentaje de Sodio Intercambiable) del suelo, las condiciones texturales y, entre otros factores, el régimen pluviométrico. Para calcular la cantidad de yeso necesaria para corregir problemáticas de sodicidad puede basarse en el PSI original y el deseado, expresando, a partir de esas cifras, la cantidad de Na a ser reemplazado. A título de ejemplo se presenta la Tabla 59 con datos analíticos de un suelo a tratar.

Tabla 59. Composición del complejo intercambiable de un suelo sódico

Propiedad	Horizonte		
	A	E	Bt
Profundidad (cm)	0 - 23	23 - 35	35 - 80
CIC (cmolc/kg)	20,9	13,6	29,0
Cationes de intercambio (cmolc/ kg)			
Ca^{2+}	11,1	7,2	9,2
Mg^{2+}	2,4	2,2	4,5
Na^+	1,3	3,0	12,3
K^+	1,3	0,9	3,0
PSI (%)	6	22	42

Planteemos la situación de pretender reducir el PSI de 6% a 3% en el horizonte superior y de 22% a 10% en el horizonte E.

Horizonte A:
PSI = 6 % = 1,3 x 100/ 20,9
PSI = 3% = X * 100/20,9, por lo tanto X = 3 x 20,9 /100 = 0,63 cmolc/kg
Es decir, de un valor de 1,3 cmolc/kg de Na^+ pretendemos llegar a 0,63 cmolc/kg, o sea, reemplazar 0,67 cmolc/kg, lo que equivale a 0,154 g/kg de Na^+ (Peq Na = 23 gr).

Efectuando los cálculos a nivel de hectárea, asumiendo una densidad de 1,2 t/m^3, se tiene:
Peso hectárea (Horizonte A)= 10.000 m2 x 0,23 m x 1,2 t/m^3 = 2.760 t/ha
Na intercambiable a reemplazar = 0,154 x 2.760 = **425 kg/ha**

Horizonte E:
PSI = 22 % = 3 x 100/ 13,6
PSI = 10% = X x 100/13,6 por lo tanto X = 10 * 13,6 /100 = 1,36 cmolc/ kg
Es decir de un valor de 3 cmolc/ kg de Na+ pretendemos llegar a 1,36 cmolc/kg, es decir reemplazar 1,64 cmolc/kg, lo que equivale a 0,377 g/kg de Na^+.

Efectuando los cálculos a nivel de ha asumiendo densidad 1,3 t/m^3 se tiene:
Peso hectárea (Horizonte E) = 10.000 m^2 x 0,12 m x 1,3 t/m^3 = 1.560 t/ha
Na intercambiable a reemplazar = 0,377 x 1.560 = **588 kg/ha**

Sumando las necesidades de enyesado de los horizontes A (425 kg ha^{-1}) y E (588 kg/ha) , se tiene un total de 1.013 kg/ha.

El valor obtenido a través de este cálculo debe afectarse por la eficiencia del producto, dada especialmente por su pureza y el tamaño de partícula, y por la tasa de intercambio, es decir el porcentaje de Ca^{2+} que es capaz de reemplazar al Na^+ adsorbido. Esta posibilidad de intercambio depende de la concentración total de sales y del PSI, siendo mucho mayor a altos valores de PSI. La remoción del Na^+ a PSI < 10% puede ser reducida, pues parte del Ca^{2+} reemplaza al Mg^{2+} intercambiable, pudiendo en estos casos la eficiencia ser menor al 30%. La eficiencia también puede ser reducida en texturas finas, debido al lento intercambio ocurrido dentro de las unidades estructurales, por una cuestión de flujo de la solución a través de los finos capilares de la microporosidad.

Existe un método analítico para evaluar la necesidad de enyesado, el cual consiste en el agitado de 5 g de suelo problema, con 100 ml de una solución conteniendo no menos de 28 meq/l de Ca en forma de yeso, filtrado y evaluación de Ca y Mg en el líquido resultante. El Ca retenido por el suelo permite calcular la necesidad de yeso.

Existen en el mercado otros productos correctores de suelos sódicos, los que reaccionan de manera diferente, de acuerdo a la presencia o ausencia de carbonatos alcalino-térreos:

S elemental: necesita ser oxidado por acción microbiana hasta llegar a H_2SO_4, por lo que se lo considera de reacción lenta.

- Suelos con carbonatos alcalino-térreos

$2\,S + 3O_2 \longrightarrow 2SO_3$ (oxidación microbiológica)

$2SO_3 + 2H_2O \longrightarrow 2H_2SO_4$

$2\ H_2SO_4 + 2CaCO_3 \longrightarrow CaSO_4 + CO_2 + H_2O$
$X– 2Na + CaSO_4 \longrightarrow X – Ca + Na_2SO_4$

Suelos sin carbonatos alcalino-térreos
$2\ S + 3O_2 \longrightarrow 2SO_3$
$2SO_3 + 2H_2O \longrightarrow 2H_2SO_4$
$X– 2Na + H_2SO_4 \longrightarrow X – 2H + Na_2SO_4$
FeSO4 (ó Al2(SO4)3) : son de acción inmediata, pues se hidrolizan rápidamente.

Suelos con carbonatos alcalino-térreos
$FeSO_4 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4 + FeO$
$H_2SO_4 + CaCO_3 \longrightarrow CaSO_4 + CO_2 + H_2O$
$X– 2Na + CaSO4 \longrightarrow X – Ca + Na2SO4$

Suelos sin carbonatos alcalino-térreos
$FeSO_4 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4 + FeO$
$H_2SO_4 + CaCO_3 \longrightarrow CaSO_4 + CO_2 + H_2O$
$X– 2Na + H_2SO_4 \longrightarrow X – 2H + Na_2SO_4$

Polisulfuro de Ca: es un líquido alcalino de color oscuro, debe ser oxidado para actuar por lo que es de reacción lenta.
H_2SO_4: es de reacción rápida, pero tiene dificultades de manipuleo y es cáustico.
$CaCl_2$: es de reacción rápida pero su costo suele ser elevado.
La equivalencia entre los mejoradores puede consultarse en la Tabla 60

Tabla 60. Equivalencia entre mejoradotes de la sodicidad

Producto	Mg (t) del mejorador equivalente a 1 (t) de S
S	1
Polisulfuro de Ca	4,17
H_2SO_4	3,06
$FeSO_4$	8,69
Yeso	5,38
$Al_2(SO_4)_3$	6,94

Las enmiendas a disolver en el agua de riego, son más efectivas si el agua es de baja salinidad (menor de 0,2 dS/m) o de alto RAS y contenido de salinidad medio o bajo (menor 1,0 dS/m). Si la salinidad del agua es de moderada a alta y el RAS alto, es aconsejable optar por la aplicación de enmiendas directamente al suelo.
El yeso es particularmente efectivo si se aplica con aguas de muy baja salinidad (CE menor a 0,5 dS/m), pero no lo es si la salinidad del suelo es elevada, debido a la dificultad de disolver suficiente calcio en la solución para contrarrestar el efecto del sodio. En la práctica, es común alcanzar concentraciones de calcio de 1 a 4 meq/l. Esta pequeña cantidad de calcio incrementará de 100 a 200 % la infiltración. La velocidad con la cual el yeso se incorpora a la solución depende de la finura del material. Aunque su costo es más elevado, el yeso finamente molido (partículas de menos de 0,25 mm de diámetro) se disuelve más rápidamente y es el más indicado para la aplicación en el agua de riego. En el caso de la incorporación en el suelo, puede usarse yeso con un grado de pureza menor y con tamaño de partícula más gruesa.

3.- Método mecánico: consiste en la arada a profundidades de 60 cm a 1 m, con la finalidad de poner en superficie el Ca contenido en las capas más profundas del suelo. Se trata de un método cuyo éxito depende de la concentración y profundidad de

estas capas con Ca, pero siempre requiere de maquinarias especiales y altas potencias de tractor, por lo que no siempre es factible. Simultáneamente, puede objetársele que un movimiento de suelo tan importante como el que implica el método, deteriora la escasa estructura que un suelo sódico pudo haber desarrollado a lo largo de su génesis.

2º etapa

Como se desarrollara precedentemente, esta etapa consiste en el lavado del Na reemplazado en los sitios de intercambio catiónico. Si se trata de una zona húmeda o en invernáculos, el volumen de agua necesaria puede estar garantizada, siempre que sea de buena calidad, pues si se trata de agua de napa, se corre el riesgo de que sea sódica y no pueda ser utilizada con este fin. Sin embargo, para el lavado existe otro requisito que es la posibilidad de drenaje.

Tratamiento para suelos salinos

Los suelos salinos en áreas de producciones intensivas, se pueden recuperar a través del lavado de las sales. Como se comprenderá, esto es posible si existe la posibilidad de riego con agua de buena calidad, no salina, y el drenaje permite la evacuación de las sales, es decir, no hay una napa cercana a la superficie.

La distribución de la salinidad en los suelos varía en función de la profundidad y a lo largo del tiempo. Las lluvias de otoño provocan un lavado descendente de las sales, mientras que la evapotranspiración de primavera hace que el flujo se invierta y se produzca un ascenso de las mismas.

Este tipo de procesos pueden ocurrir igualmente en suelos de regadío cuando el agua de riego mantenga un cierto nivel de salinidad. En estos casos, para evitar la acumulación de sales en la zona de enraizamiento, se hace necesario suplementar las dosis de riego, con objeto de que el agua sobrepase la zona de enraizamiento y lave las sales de ella. Con este fin, Ayers *et al* (1985) establecen los conceptos de fracción de lavado y requerimientos de lavado:

Fracción de lavado (FL)

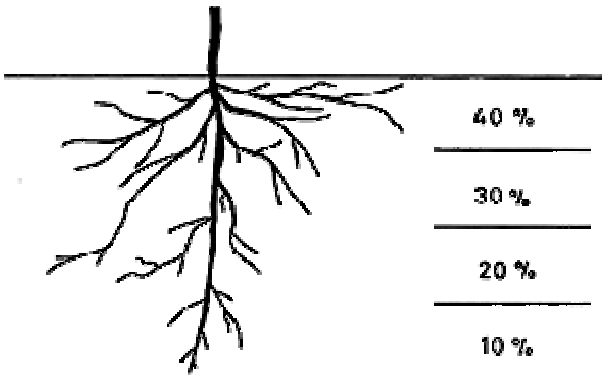
Es la fracción de agua riego que atraviesa la zona radical y es susceptible de lavar las sales. FL= Fd / Fr, siendo Fd los centímetros de agua drenada por debajo de la zona radicular y Fr el total de centímetros de agua aportada. Del total de agua aportada por el riego (Fr) una parte quedará retenida en el suelo en los horizontes superficiales, correspondiente a la zona del enraizamiento, mientras que otra parte de agua se infiltrará hacia los horizontes profundos. La parte del agua que drena hasta más allá de la zona ocupada por las raíces de las plantas (Fd), es la que al pasar a través de la zona radical disolverá las sales. Como criterio orientativo, un valor de FL de 0,5 se puede considerar alto (la mitad del agua aportada pasa a través de la zona radical y alcanza horizontes más profundos) mientras que un valor de 0,1 se considera bajo (sólo el 10% del agua de riego alcanza los niveles profundos).

Requerimientos de lavado (RL)

Es la fracción calculada de agua que debe pasar a través de la zona radical para mantener el valor de CE o del RAS del suelo, en un determinado nivel o por debajo de él. Lógicamente cuanto menor sea el nivel al que hay que mantener los parámetros anteriores, el cual vendrá determinado por el tipo de cultivo, mayores

serán los RL. Hay que tener en cuenta que el valor de CEs nunca podrá ser inferior a la conductividad del agua utilizada en el riego (CEar) y cuanto mayor sea CEar mayor deberá ser RL para evitar la salinización.

Lo ideal será que el valor de FL fuese igual o mayor que RL, de otra forma se producirá un aumento progresivo de la salinidad en profundidad. En este sentido, es importante conocer que las plantas absorben el 70% del agua a través de la mitad superior de su zona radical.



Si a esto le unimos que las plantas responden al nivel de salinidad de la zona menos salina, se comprende que los requerimientos de lavado deben ser suficientes para eliminar las sales de, al menos, la mitad superior de la zona de enraizamiento. En esta zona, la salinidad deberá aproximarse a la del agua de riego, de forma que sea el valor de CEar el que controle la respuesta de las plantas.

Para establecer los RL hay que tener en cuenta que debe existir un equilibrio entre las sales que tiene el suelo y las que le llegan por el agua de riego, por un lado, y las sales que le quedan después del riego y las que se exportan por las aguas de drenaje, por otro lado. Si evaluamos las sales a partir de la conductividad, este balance sería:

$$\mathbf{AR \times CEar + As \times CEs = As \times CEs^* + AD \times CEad}$$

Donde: AR es la cantidad de agua utilizada en el riego (mm), CEar es la conductividad del agua de riego (dS/m), As es la cantidad de agua que retiene el suelo a saturación (mm), CEs es la conductividad del extracto de saturación, CEs es la conductividad del extracto de saturación a la que queremos que quede el suelo después del riego, AD es la cantidad de agua de drenaje (mm) y CEad es la conductividad del agua de drenaje.

Otro aspecto a tener en cuenta es la efectividad del lavado del agua de riego, la cual sería máxima cuando CEad = CEs, tal y como hemos supuesto anteriormente. No obstante, en suelos con grietas, parte del agua de riego atraviesa rápidamente el suelo (no disuelve sales) y su conductividad es muy inferior a CEs (no llega a alcanzar el equilibrio con el suelo). En estos casos CEad = f x CEs, donde f dependerá de los parámetros texturales y estructurales del suelo y que a escala muy general se puede estimar a partir de la Tabla 61.

Tabla 61. Efectividad del lavado de sales (f) según textura del suelo

Suelo	f
arenoso	0,9 - 1,0
franco arcillo limoso a franco arenoso	0,8 - 0,95
arcilloso	0,2 - 0,6

Por tanto, para conocer el RL es preciso conocer la profundidad de enraizamiento del cultivo, la humedad de la zona de enraizamiento a saturación (mm), y en el momento del riego, los valores de CEs a los cuales el cultivo es rentable, la CEs, la CEar y, si es posible, la efectividad del riego (f).

Para un manejo adecuado de estos suelos, es necesario hacer un seguimiento de los mismos, con el fin de controlar su evolución.

El **control periódico**, exige una medida de la salinidad confiable y operativa a nivel de campo. La más frecuente es la toma de muestra de suelo y su análisis en laboratorio. Existe, actualmente, la posibilidad de medidas en el campo rápidas y simples y no destructivas, que facilitan el conocimiento de la evolución de la salinidad.

En parcelas de seguimiento y para determinados cultivos, se usan lisímetros elementales de drenaje que permiten obtener lixiviados y determinar en ellos los iones del agua de drenaje, posibilitando hacer un balance salino del perfil del suelo.

Con ciertos niveles de salinidad, se pueden obtener rendimientos aceptables, si se eligen aquellas plantas tolerantes a estos niveles. Para ello, utilizaremos las tablas correspondientes, que nos sirven como base para la selección de cultivos y predecir los posibles rendimientos. Pero los valores dados en las tablas pueden quedar alterados, tanto por las condiciones específicas de cada parcela, como por la aplicación de técnicas de cultivo adecuadas. Nos referiremos a aquellas técnicas que pueden alterar significativamente dichos valores.

En la **preparación del suelo**, se debe conseguir que el movimiento del agua, tanto en profundidad como en superficie, sea lo más uniforme posible, facilitando el drenaje y el desagüe, con labores que eliminen el piso de arado y actúen sobre los límites abruptos entre horizontes. Con un riego de presiembra, capaz de lavar las sales precipitadas en la estación seca, se dispondrá de un perfil de partida menos salino. Se evitará la formación de una costra superficial, frecuente en estos suelos de elevada concentración de sales y con efectos negativos sobre la nascencia de las plantas. Con esta misma finalidad, se puede emplear cualquier material sobre el terreno, que tenga un efecto de **mulching,** manteniendo la humedad de los horizontes superficiales y los niveles de concentración de las sales, dentro de valores aceptables por las plantas seleccionadas. Tal sucede con los enarenados, que consiguen bajar los porcentajes de reducción de cosecha, que figuran en la bibliografía, para cultivos sensibles a determinados niveles de conductividades del extracto de saturación, o del agua empleada en el riego.

La **siembra** debe de realizarse de tal manera que se consiga una buena germinación y nascencia. Para ello la semilla debe estar localizada en zonas donde la concentración de sales sea lo más baja posible y disponga de la humedad suficiente. Si el riego se hace por surcos, el lugar recomendable de colocación de la semilla en la mitad del lomo. La previsible disminución del porcentaje de germinación que ocasiona la concentración de sales, se puede paliar aumentando la dosis de siembra.

El **riego** afecta directamente a las condiciones salinas y no solamente por la calidad del agua. La técnica de riego empleada influye en la variación del potencial hídrico del suelo, encontrándose las fluctuaciones más amplias en los sistemas de gravedad (por inundación),y manteniéndose casi constante este potencial en los riegos de alta frecuencia (aspersión y goteo). Igualmente estos sistemas inciden en los

contenidos de humedad del suelo y como consecuencia en la variación de la concentración de sales. Los riegos de alta frecuencia y localizados, mantendrán esta concentración casi uniforme dentro de la zona mojada, pero será elevada en los límites de ésta. La distribución de sales será más uniforme en los de gravedad y aspersión, pero a medida que los intervalos entre riegos aumentan, las variaciones en el contenido de humedad lo harán también y como resultado la concentración de sales, encontrándose las conductividades menores, inmediatamente después del riego y las mayores al final de cada intervalo. El lavado de sales será mayor con los riegos de gravedad y aspersión y menor en los localizados. A medida que la eficacia del riego calculada para compensar solamente la evapotranspiración, sea más alta, los lavados de sales serán menores, lo cual, tendrá su incidencia en los rendimientos.

La **fertilización** ha de realizarse adecuadamente, especialmente en cuanto a la selección y su localización. Se deben usar abonos y fertilizantes que no eleven los contenidos iónicos causantes de la salinidad.

La aplicación de los fertilizantes a través del agua de riego, altera la composición de sales de ésta y como consecuencia de la solución del suelo. Se deben seleccionar clases y cantidades máximas de abono por volumen de agua de riego aplicada, para no incidir negativamente en la presión osmótica de la solución del suelo. Esta técnica, normalmente es empleada en riegos localizados y como consecuencia, actúa con rapidez y directamente sobre el volumen de suelo explorado por las raíces, por lo cual, puede tener consecuencias negativas, o beneficiosas si se utilizan productos que mejoren las condiciones químicas del agua del suelo. Finalmente todos aquellos fertilizantes que mejoran las propiedades físicas del suelo, facilitarán el movimiento de agua del perfil. La **incorporación** de materia orgánica actúa, particularmente, sobre estas propiedades facilitando la circulación del agua y el lavado de sales, a la vez que confiere fertilidad química, aportando nutrientes.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Acha P., Szyfres B. 1977. Zoonosis y enfermedades transmisibles comunes al hombre y a los animales. Organización Panamericana de la Salud. Publicación Científica N° 354.

Adebiyi O.A., Koike M., Konaka T., Yuzawa S. Kuroishi I. 1991 Compaction characteristics for the towed and driven conditions of a wheel operating on agricultural soil. Journal of Terramechanics 28(4): 371-382.

Adiscott T..M. 1995. Modelling the fate of crop nutrientes in the environment: problems ofscale and complexity. Eur. J. Agron. 4(4): 413-417.

Aguilera Martínez, M. y R. Martínez Elizondo. 1983. Relaciones agua suelo planta atmósfera. Ed. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Alakukku L. 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I Short- term effects on the properties of clay and organic soil. Soil and Tillage Research 37: 211-222. Amsterdam, Netherlands

Alakukku L. 1997. Properties of fine-textured subsoils as affected by high axle load traffic. In: Academic Dissertation: Long term soil compaction due high axle load traffic.

Alakukku L., Elonen P. 1995. Long-term effect of a single compaction by heavy fiel traffic on yield nitrogen uptake of anual crops. Soil and Tillage Research 36: 141-152.

Alberta Farm Machinery Research Centre PAMI. 1991. Evaluation report 641 Tye Paratill model 118-610.

Amma A.T., del Pardo C.K. 2007. Efecto de la aplicación de dosis crecientes de potasio sobre rendimiento y calidad de tomate (Lycopersdicum sculentum Mill.) cultivado en invernadero. II Tomate redondo común. http://www.inta.gov.ar/sanpedro/info/doc/2007/aa_0701.htm. Consultado 3/4/08.

Amma T., Mitidieri I., Bimboni H. 1994. Curso a Distancia. Producción de hortalizas en invernáculo. Módulo 3. Aspectos generales del cultivo, cap. 10: 16-22.

Andreu Soler E. 1996. Tesis doctoral: Respuesta física y reológica del suelo a un proceso de compactación simulado mediante ensayos de compresión uniaxial. Universidad Politécnica de Madrid. España.

Asociación de Ing. Agr. del Noreste de Entre Ríos. Artículos técnicos de horticultura Nota 3. 2006. En http://www.aianer.com.ar/horticultura/nota3.htm

Auge M. 2003.Vulnerabilidad de Acuíferos. Conceptos y Métodos.

Auge M., Hirata R., López Vera F. 2004.Vulnerabilidad a la Contaminación por Nitratos del Acuífero Puelche en La Plata – Argentina. CEAL. p. 2, 3, 47, 57.

Ayala C.D., Di Prinzio P.A., Magdalena J.C. 1996. Estudio comparativo de cinceles rígidos y flexibles en un suelo Acuicambids fluventic. Memorias del IVº Congreso Argentino y IIº Internacional de Ingeniería Rural 1: 93-99.

Ayers R.S., Wescot D.W. - 1987 - La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO: Riego y Drenaje. Roma. Nº29 (Rev.1) 173 p.

Balbuena R.H., Claverie J., Terminiello A., Mac Donagh P., Bartosik R. 1996. Efecto de la ubicación de cuchillas circulares sobre la prestación de escarificadores de arcos rígidos. Memorias del IV Congreso Argentino de Ingeniería Rural, Neuquén Argentina. 1: 173-178.

Balbuena R.H., Claverie J.A., Terminiello A.M. 1992. Evaluación a campo de rejas de escarificador de cinceles. Anais do XXIer Congresso Brasileiro de Engenharía Agrícola 3: 1707-1717.

Balbuena R.H., Mendivil G., Ressia M. 1996. Energía requerida en distintos sistemas de labranza vertical. Revista Agro-Ciencia. Número extraordinario resúmenes del

Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola, Chillán, Chile, 24 al 26 de noviembre de 1994, 23.

Balbuena R.H., Terminiello A.M. 1993. Determinación en campo del comportamiento dinámico de un conjunto tractor-escarificador. Anales I Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola. Santiago de Chile

Balcaza L. F. 1995. Fertirrigación en cultivos hortícolas. Boletín Hortícola 3 (8): 21-22.

Balcaza L. F. 1995. Fertirrigación en tomate. Boletín Hortícola 3 (6):15-17.

Balcaza L. F. 1996. Fertirrigación en cultivos hortícolas. Boletín Hortícola , octubre: 7-12.

Balcaza L. F. 2003. Fertilización en pimiento. IDIA XXI 3 (4): 114-120.

Balcaza L. F. 2006. Manejo de cultivo de pimiento. Boletín hortícola 11 (33): 18 – 20.

Balcaza L. F. 2006. Manejo de cultivo de pimiento. Boletín hortícola 11 (34): 13 – 18

Ball B.C., Parker J.P., Scott A. 1999. Soil and residue management effects on cropping conditions and nitrous oxide fluxes under controlled traffic in Scotland. 2. Nitrous oxide, soil N status and weather. Soil and Tillage Research 52: 191-201.

Benez S.H., Bicudo S.J., Pereira Lanças K.. 1991. Subsolador: Influencia do número de hastes, larguras da sapata e profundidade de trabalho em alguns parámetros relacionados a mobilizaçao do solo. Anais do XX° Congresso Brasileiro de Engenharía Agrícola 2: 925-940.

Black C. 1975. Relaciones suelo-planta. Editorial Hemisferio Sur. Tomo 1. p. 299-310, 391-415.

Breland T.A., Hansen S. 1996. Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction. Soil Biol. Biochem. 28 (4/5): 655-663.

Camozzi M.E. 2007. Importancia y manejo del fósforo en cultivos hortícolas. www.fertilizando.com/articulos/buscadorArticulosFertilizantes.asp. Consultado 2/10/07.

Cary J.W. 1985. Potato tubers and soil aeration. Agronomy Journal. May-jun.

Casão Junior R., Chang C.S. 1993. Estudo dos eforços tridimensionais em hastes de paraplow em caixa de solo. Actas XXII Congresso Brasilero de Engenharía Agrícola 3: 1878-1893, Ilhéus, Brasil.

Claverie J.A. 1997. Prestación en campo de arcos de escarificador rígidos y flexibles. Tesis de Maestria. Biblioteca parcial del Curso de Post grado en Ingeniería Rural. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP (Inédito).

Claverie J.A., Balbuena R.H., Terminiello A.M., Mac Donagh P.M., Palancar T.C.. 1998. Energía requerida y área trabajada por escarificadores rígidos de montantes inclinados. En Ingeniería Rural y Mecanización Agrícola en el ámbito Latinoamericano, p.171-177. Balbuena, R.H.; Benez, S.H.; Jorajuría, D. Editorial de la UNLP, La Plata.

Consigli R. 2000. Agricultura y medio ambiente. 1000 citas para una producción sustentable, 16 p.

Cornillon P. 1974. Croissance et développement du pimient doux sous serre. Pép. Hort. et Mar. 148: 41-51.

Cox E.F. 1981. The effect of trackle irrigation, misting and row position on the incidence of tip-burn of field lettuce. Scientia Horticulturae 15 (2): 101- 106.

Chisolm T.S., Porterfield J.G., Batchelder D.G.. 1970. A soil bin study of three dimensional interference between flat plate tillage tools operating in an artificial soil. ASAE paper N°70-122.

Darwich N.1998. Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes. Talleres Gráfica Armedenho. 182 p.

Dexter A.R. 1991. Amelioration of soil by natural processes. Soil and Tillage Research, 20: 87- 100.

Dexter A.R., Czyz E.A. 2000. In: Wilson, M.J., Maliszewska-Kordybach, B. (Eds.), Soil.

Domínguez Vivanco A. 1993. Fertirrigación. Mundi Prensa, Madrid, España.

Equipo Proyecto Fertilizar INTA. 1999. El ambiente edáfico bajo fertirriego. Fertilizar, setiembre: 7 – 11. INTA, Pergamino, Buenos Aires.

Equipo Proyecto Fertilizar INTA. 2007. Fertilizantes y soluciones concentradas. www.fertilizando.com/articulos/buscadorArticulosFertilizantes.asp. Consultado 2/10/07.

Erbach DC 1987 Measurement of soil bulk density and moisture. Transactions of the ASAE, 30 (4): 922-931.

Fairbridger F.C. 1979. The Encyclopedia of Soil Science Part 1. Dowden, Hutchinson and Ross Inc.

Fielke J.M., O'Driscoll D.A. 1986. Comparison testing to evaluate coulter wheel performance. In Conference on Agricultural Engineering. Adelaide. Australia 1: 52-56.

Finck A. 1985. Fertilizantes y fertilización. Ed. Reverté 225 p.

Gavande, S. 1982. Física de suelos. Principios y aplicaciones. Ed. Limusa-Wiley. México.

Glinski J., Lipiec J. 1990. Soil Physical Conditions and Plant Roots. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 250 p.

Godwin R.J., Spoor G. 1977. Soil failure with narrow tines. J. Agric. Engng. Res. 22 (3): 213-228.

Godwin R.J., Spoor G., Soomro M.S. 1984. The effect of tine arrangement on soil forces and disturbance. J. Agric. Engng. Res. 30: 47-56.

Gupta SC, Larson WE. 1989. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. Water Resour. Res. 15: 1633-1635.

Håkansson, I., Voorhees W.B., Riley H. 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. Soil Tillage Res. 35: 239-282.

Hamza M.A., Anderson W.K.. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Research. En prensa.

Hassink, J. 1992. Effects of soil texture and structure on carbon and nitrogen mineralization in grassland soil. Biology and Fertility of Soil. 14: 126-134 .

Hassink, J., Bouwman L.A., Zwart K.B., Broussaard L.. 1993. Relationship between habitable pore space, soil biota and mineralization rates in grassland soil. Soil Biology and Biochemistry 24: 47-55.

Hilbert J., Tesouro M.O.. 2000. Demanda energética e impacto sobre el suelo de subsoladores de arco curvo Cultivie. 2000. VI Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II Congreso Americano de Educación en Ingeniería Rural. 18 al 20 de octubre de 2000. Edición especial en CD-Rom. Maq. 1-19

Instituto de Geomorfología y Suelos. 2006. Análisis ambiental del Partido de La Plata. Ed. CFI, Municipalidad de La Plata. ISBN 987-510-062-5. La Plata, Buenos Aires. 124 p.

Kaye Wachsmuth I. 2006. Escherichia coli O157:H7 - Forjador de Cambios en la Inocuidad Alimenticia y las Tradiciones en el Mundo Industrializado. Office of Public Health and Science, Food Safety and Inspections Service, U.S. Dept. of Agriculture. En:http://www.worldfoodscience.org/cms/?pid=1001311

Kepner R.A. Bainer R., Barger L.E. 1982. Principles of Farm Machinery. Third Edition The Avi Publishing Company. Inc. Westport Connecticut. 180-182

Kramer, P. 1987. Relaciones hídricas de suelos y plantas. Ed. Edutex SA México.

Lipiec J., Arvidsson J., Murer E. 2003. Review of modeling crop growth, movement of water and chemical in relation to topsoil and subsoil compaction. Soil and Tillage Research 73: 15-29.

Logsdon S.D.,Karlen D.L. 2004. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. Soil and Tillage Research 78: 143-149.

Lupin M. Magen H., Gambash Z. 2007. Preparando uno mismo soluciones para fertirriego. www.fertilizando.com/articulos/buscadorArticulosFertilizantes.asp. Consultado 2/10/07.

Malavolta E. 1994. Fertilizantes e seu impacto ambiental. ProduQuímica.

Malavolta E., Vitti G., de Oliveira S.. 1989. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Ed. Asociação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, Brasil. 201 p.

Mallett J. B., Lang P. M.. 1987. The use of a slant leg plough to relieve compaction in directly drilled maize. Applied Plant Science 1(1):49-51.

Maroni J. 1990. Actas del Ier Congreso Argentino de Ingeniería Rural. Universidad Argentina de la Empresa. Buenos Aires, 6 al 9 de agosto de 1990.

Maroto J.V. 1990. Elementos de horticultura general. Ed. Mundi Prensa, Madrid, España. ISBN 84-7114-297-X. 343 p.

Maroto J.V. 2002. Horticultura herbácea especial. 5º Ed. Ed. Mundi Prensa, Madrid, España. 702 p.

Martín de Santa Olalla y Mañas, F. y J. De Juan Valero. 1993. Agronomía del riego. Ed. Mundi-Prensa. Madrid

Mc Kyes E. 1985. In: Soil cutting and tillage. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, p. 97.

Minhas P.S., Gupta R.K. - 1992 - Quality of irrigation water. Assessment and Management. Information and Publication, ICAR, p. 102.

Mollinedo V., Tapia A.. 2003. Fertirrigación en cultivo de tomate bajo invernadero. En: www.fertilizando.com/articulos/CursoFertirrigacion2003/ProgramacionRiegoyFertirriego.ppt . Consultado 12/07.

Mouazen A.M., Neményi M.. 1999. Tillage tool design by the finite element method: part 1. Finite element modelling of soil plastic behaviour. J. Agric. Engng. Res. 72: 37-51.

Organización Panamericana de la Salud. Citerios de salud ambiental 5. Nitratos, nitritos, y compuestos de N-Nitroso. p. 69-71. 1955.

Ortiz Canavate J., Ruiz M., Hfrnanz J.L. 1987. Las máquinas agrícolas y su aplicación. (3 ed.) Ed. Mundi-Prensa. Madrid. p. 19-70.

Payne P.C.J., Tanner D.W. 1959. The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements. J. Agric. Engng. Res. 4(4): 312-325.

Pizarro F.- 1985 - Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos. Ed. Agrícola Española S.A., 2° Ed., Madrid. Cap. 3 y 4. 542 p.

Raghavan V.G., Alvo P., Mc Kyes E. 1990. Soil compaction in agriculture: A view toward managing the problem. In: Advances in Soil Science. Soil Degradation 11: 1-32.Ed.:Lal and Stewart.

Reinert D., Reichert J., Aita C., Cubilla M. 2001. Una alternativa para disminuir la compactación en siembra directa. www. revistaelproductor.com.

Riley T.W., Fielke J.M. 1990. Evaluation of coulter wheels. In Asia-Pacific Regional Conference on Engineering for the development of agriculture 1: 33-42. Nordin Inrahim Editors.

Ruscitti M., Arango M.C., Ronco M.G., Peluso O., Beltrano J. 2006. Fisiología de la micorrización con Glomus Mosseae en pimiento. Efecto del estrés hídrico In: XXVI Reunión de la Asociación Argentina de Fisiología Vegetal, Chascomús. XXVI Reunión de la Asociación Argentina de Fisiología Vegetal. p.132

Russell, J. y W. Russell. 1968. Condiciones del suelo y crecimiento de las plantas. Ed. Aguilar. Madrid.

Sheid Lopes A. 2005. Micronutrientes en la experiencia brasilera. Filosofía de aplicación y eficiencia agronómica. En Micronutrientes en la agricultura. Cap.2: 29-78. Ed. Vázquez M., AACS. 207 p.

Sitaula B.K., Hansen S., Sitaula J.I.B., Bakken L.R. 2000. Effects of soil compaction N2O emission in agricultural soil. Chemoshere Global Change Science 2: 367-371.

Smittle D.A., Williamson R.E. 1977. Effect of soil compaction on nitrogen and water use efficiency, root growth, yield, and fruit shape of pickling cucumbers. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 102 (6): 822-825.

Soil Survey Staff. 1999. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Agriculture Handbook Number 2nd ed 436, 870 p.

Soomro M.S., Spoor G., Godwin R.J. 1982. Appropiate tine arrangement for better tillage and efficient tool performance. Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America p. 21-26. Autumn.

Spoor G., Fry R.K. 1983. Soil disturbance generated by deep-working low rake angle narrow tines. J. Agric. Engng. Res. 28: 217-234.

Spoor G., Godwin R.J. 1978. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. J. Agric. Engng. Res. 23: 243-258.

Srivastava A.J., Goering C.E., Rohrbach R.P. 1994. Engineering Principles of Agricultural Machines. American Society of Agricultural Engineers p.151.

Stephan M. 1971. La fertilization. La laitue de serre. Journées d`Etudes : 87-92. INVULFLEC. París.

Stepniewski W., Glinski J., Ball B.C. 1994. Effects of compaction on soil aeration properties. In: Soane,B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), Soil Compaction in Crop Production: 167–190. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Stone D.A. 1988. Subsoil strength and yield of vegetable crops. Soil use and management 4 (1): 10-14.

Stranberg J.O., White J.M. 1979. Effect of soil compaction on carrot roots. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 104 (3): 344-349.

Swan J.B., Moncrief J.F., Voorhees W.B. 1987. Soil Compaction. Causes, Effects, and Control.AG-BU-3115.

Taboada M. A., Micucci F.G. 2002. Fertilidad Física de los suelos, Editorial Facultad de Agronomía, UBA. 79 p.

Terminiello A., Balbuena R., Claverie J., Mac Donagh P.. 1997. Efecto de la adición de cuchillas circulares sobre escarificadores de cinceles 13 (3): 331-335.

Terminiello A.M., Balbuena R.H., Claverie J.A., Casado J.P. 2000. Compactación inducida por el tránsito vehicular sobre un suelo en producción hortícola. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 4-2: 290-293.

Terminiello A.M., Claverie J.A., Balbuena R.H., Casado J.P. 2000. La intensidad de tránsito vehicular y su incidencia sobre el rendimiento del repollo (Brassica oleracea L. Grupo capitata). Memorias del Congreso Latinoamericano de Ingeniería Agrícola. Trabajo completo editado en CD Rom.

Terminiello A.M., Claverie J.A., Casado J.P., Balbuena R.H. 2000. Evolución de la resistencia a la penetración durante el ciclo de un cultivo hortícola. En: Avances en Ingeniería Agrícola 1998/2000. ISBN 950-29-0593-8. Editado por la Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. p. 69-73.

Terrón P, Cornejo J., Cerdá A. 1998. Fertilidad y ciclos de nutrientes en el suelo. Cap.7:145-172. Agricultura sostenible. Coedición Agrofuturo. Life. Edic. Mundi Prensa.

Thornthwaite C.W., Mather J.R.1957. The Water Balance, Publications in Climatology, Vol. X, No. 3, Drexel Institute of Technology, Centerton, NJ.

Threadgill E.D. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. Transaction of the ASAE 25: 859-863, St. Joseph.

Tschapek, M. 1966. El agua en el suelo. CSIC. Madrid.

Vázquez M. 2003. Tesis Doctoral. EVALUACIÓN DE LA ALTERACIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES EDÁFICAS BAJO RIEGO COMPLEMENTARIO EN SUELOS DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES. Facultad Cs Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata.

Vigliola I. 1996. Manual de Horticultura. Editorial Hemisferio Sur.

Watt B.K. 1975. Composition of Foods. Agricultural Handbook Nº8. US. Dep. of Agric. Washington, EEUU.

Welch N.C. 1983. Lettuce efficiency in using fertilizar nitrogen. California Agriculture. Nov.-Dec.: 18-19.

Willat S.T., Willis A.H. 1965. A study formed by the passage of tines through soil. J. Agric. Engng. Res. 10(1) 1-4.

Wolfe D. W., Topolewski D.T., Gundersheim N. A., Ingall B. A. 1995. Growth and yield sensitivity of four vegetable crops to soil compaction. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 120-6: 956-963.

World Health Organization. Enterohaemorrhagic Escherichia coli (EHEC). 2005. En: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs125/en/

Vázquez, Mabel E
Capacitación para la recuperación de suelos degradados de pequeños productores del cinturón hortícola del Gran La Plata : valoración del problemas y estrategias correctivas / Mabel E Vázquez y Antonino Terminiello - 1a ed. - La Plata : Univ. Nacional de La Plata, 2008.
CD-ROM.

ISBN 978-950-34-0471-3

1. Fertilización. 2. Edafología. I. Terminiello, Antonino II. Título
CDD 631.8

Correos electronicos:

- mvazquez@agro.unlp.edu.ar
- amtermi@agro.unlp.edu.ar