



Universidad
de Alcalá

FACULTAD DE CIENCIAS

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Gestión de cultivos y su impacto en el suelo

Autor: SERGIO LOPEZ PINA

Tutor/es: Ramón Bienes y Teresa Bardají

2020



Universidad de Alcalá

FACULTAD DE CIENCIAS

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES
TRABAJO DE FIN DE GRADO

GESTIÓN DE CULTIVOS Y SU IMPACTO EN EL SUELO

Tribunal de calificación:

Presidente: _____

Vocal 1º: _____

Vocal 2º: _____

Calificación: _____

Fecha: _____

2020

INFORME PARA LA DEFENSA PÚBLICA DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

D^a Teresa Bardají Azcárate, profesora del Departamento/s de Geología, Geografía y Medio Ambiente de la UAH, como cotutora del Trabajo de Fin de Grado en Ciencias Ambientales de D. Sergio López Pina, titulado “Gestión de cultivos y su impacto en el suelo”

(*) Realizado en el Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural (IMIDRA)

(*) Dirigido por D. Ramón Bienes Allas

INFORMA:

FAVORABLE

NO FAVORABLE

Firma del tutor

Firma del cotutor

**BARDAJI
AZCARATE
TERESA - DNI
02514772K**

Firmado digitalmente por
BARDAJI AZCARATE
TERESA - DNI
02514772K
Fecha: 2020.09.22
19:23:12 +02'00'

Fdo.: Ramón Bienes

Fdo.: Teresa Bardají

(*) Para trabajos realizados fuera de la UAH.

Resumen:

Mediante una revisión bibliográfica se pretende aunar y comprender la información relevante que existe sobre la gestión de cultivos y los impactos que esta produce en el suelo. La agricultura según las prácticas que se implementen tiene unos efectos negativos o positivos en el suelo. Los manejos deficientes provocan la pérdida del carbono orgánico del suelo (COS), descensos en el fósforo (P) y el nitrógeno (N), la acidificación del suelo, cambios en la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la salinización, así como la erosión y compactación del suelo. Los manejos de conservación permiten revertir los daños causados por los usos deficientes y proteger el suelo. Las prácticas de conservación recuperan la fertilidad del suelo, aportando el COS, N y P necesarios para los cultivos. Mediante el uso de encalados se restablece el pH, reduciendo la acidez del suelo. Los cultivos de cobertura y las labranzas de conservación protegen el suelo de la erosión, aumentan el agua disponible en los cultivos y evitan que se produzca la compactación. Las prácticas de conservación agrícola permiten adaptar la agricultura al cambio climático, aumentando los rendimientos, la protección frente a plagas y a los eventos extremos. Esta revisión ha permitido comprender que efectos tiene la gestión agrícola en el suelo y cuáles son las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo más afectadas, así como los manejos más perjudiciales y aquellos que permiten proteger el suelo y revertir los problemas de las prácticas deficientes.

Palabras clave: Gestión de cultivos, COS, erosión, cultivos de cobertura, labranza de conservación

Abstract

Throughout a bibliographic review it is intended to combine and study the existing relevant information about crop management and the impacts it has on the soil. Agriculture has positive or negative effects on the soil depending on the

managements implemented. Deficient managements cause the loss of soil organic carbon (SOC), decreases in phosphorus (P) and nitrogen (N), the acidification of the soil, changes in the cation exchange capacity (CEC), the salinization, as well as soil erosion and compaction. Conservation practices allows the recovery of soil fertility by adding the SOC, N and P that crops need. The use of liming's restores the lost pH, reducing soil acidity. Cover crops and conservation tillage protects the soil from erosion, increases the water storage capacity of the soil and avoids soil compaction. Through conservation agriculture practices its possible to adapt farming to climate change, resulting in an increase of crop yield, better protection to pest and extreme weather events. This review has allowed to understand how agriculture management affects the soil and which are the most affected soil properties, as well as the most harmful practices and those that help to protect the soil and revert the problems caused by incorrect managements.

Keywords: crop management, SOM, erosion, cover crops, conservation tillage

Índice

1. Introducción	1
2. Metodología	7
3. Resultados.....	8
3.1. El papel de la materia orgánica del suelo:.....	8
3.2. El fósforo:	9
3.3. El Nitrógeno:	10
3.4. Importancia del pH del suelo:.....	11
3.5. La capacidad de intercambio catiónico:	13
3.6. Salinización inducida por los cultivos:	14
3.7. El problema de la erosión:.....	16
3.8. Erosión por laboreo:.....	18
3.9. Compactación del suelo:	19
3.10. Empleo de cubiertas vegetales y acolchados:	19
3.11. Laboreo de conservación:.....	21
3.12. Prácticas de conservación del agua en el suelo:	22
3.13. Consecuencias del cambio climático en la agricultura:	23
4. Conclusión.....	25
5. Bibliografía.....	26

1. Introducción

Las primeras evidencias de la agricultura se datan en torno al año 5300 a.C. (Bakels, 2009), hasta entonces la vida humana se había basado en la caza-recolección y en un alto esfuerzo de captura sin garantías. Con el inicio de la agricultura esta relación cambia al obtenerse alimento con una menor inversión de esfuerzo que con la caza, posibilitándose el asentamiento de los pueblos. Es por eso por lo que desde su origen hasta nuestros días ha condicionado el desarrollo de la humanidad y su relación con el medio.

La agricultura desde sus orígenes hasta la actualidad ha ido progresando, actualmente se podría decir que hay dos corrientes diferenciadas de producción agrícola que son el modelo tradicional y el modelo industrial.

El modelo tradicional es aquel que se ha usado a lo largo de la historia, con las mejoras técnicas y materiales de nuestros tiempos, como podrían ser las herramientas actuales y los sistemas de riego moderno, pero muy similar en esencia a como se realizaba en el neolítico. Una característica fundamental de este tipo de agricultura se basa en el conocimiento empírico de las poblaciones que lo practican, manteniendo a lo largo de generaciones estos conocimientos. Los cultivos tradicionales no utilizan prácticamente fertilizantes, recurren a rotaciones de cultivo, barbechos largos, en una relación directa con el medio, sin depender de insumos externos, es un sistema más próximo a las dinámicas naturales pero que tiene un rendimiento más bajo por estos motivos.

El modelo agrícola industrial aparece en los años 50 del siglo XX con la llamada "Revolución Verde", se produce un cambio por el cual se pasa del modelo tradicional a uno más sofisticado, dependiente de maquinaria, insumos externos y un rendimiento más elevado asemejándose cada vez más a los procesos productivos industriales. Este modelo prioriza la productividad frente a otras características, por lo que se abandonan los cultivos menos eficientes y se homogeniza la producción agrícola global con la consecuente pérdida de biodiversidad que conlleva (Cáceres, 2002). También hay que destacar la contaminación del suelo y el agua que acarrea este modelo, por el uso masivo de agrotóxicos para conseguir los altos rendimientos productivos.

Un tercer modelo ha ido apareciendo en las últimas décadas con el objetivo de garantizar la seguridad alimentaria, la protección del medio ambiente y la sostenibilidad de la producción agrícola, este modelo no es único por lo que se puede hablar de agroecología, agricultura orgánica u otros. Estos objetivos se consiguen con la rotación de cultivos, el no uso de agrotóxicos, el reciclado de

nutrientes y la aplicación de conocimientos científicos, con el fin de tener una producción agraria sustentable (Ortega, 2009). La necesidad de un sistema agrario con el que alimentar a la sociedad sin dañar al medio ambiente, de proximidad y ecológicamente sostenible está motivando el desarrollo de estos nuevos modelos agrarios con los que ir superando los modelos menos eficientes y dañinos por unos más justos y beneficiosos.

2. Estado general del tema

El suelo presenta características físicas, biológicas y químicas, las cuales condicionan los distintos ecosistemas que se desarrollan en ellos y sus posibles usos por lo que resulta sumamente importante conocer estas características y evitar su degradación. Según se trate de la parte física, biológica o química sus propiedades y amenazas serán diferentes, pero se relacionan estrechamente por lo que se deben considerar todos los componentes del suelo. La FAO (FAO, 2020) establece las siguientes características:

- Características físicas: la estructura del suelo, la profundidad del suelo, la disponibilidad de agua en el suelo y sus características, la textura y la porosidad
- Características químicas: la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el pH del suelo, los nutrientes disponibles, el carbono orgánico del suelo, el nitrógeno del suelo y la salinización del suelo.

El suelo es un ente dinámico que puede alterarse al cambiar sus propiedades físicas, químicas y biológicas naturales al recibir impactos o ciertos estímulos como las prácticas agrícolas. Según como se realicen estas acciones las alteraciones pueden tener efectos directos en el rendimiento y sostenibilidad de los cultivos y del propio suelo, alterando sus dinámicas naturales. Los cambios físicos pueden provocar una mayor compactación del terreno que dificulte el desarrollo radicular de las plantas y reduzca la porosidad, por lo que la infiltración será menor y habrá menos cantidad de agua disponible en el suelo, puede reducirse la capacidad de infiltración u otra serie de cambios físicos que pueden presentar inconvenientes desde la perspectiva agrícola y ecológica. Si se alteran las características químicas se pueden producir aumentos o disminuciones de la cantidad de nutrientes disponibles, alteraciones del pH, así como la pérdida o aumento de nitrógeno en el suelo y en general cambios que afectan directamente a la producción agraria a largo plazo y a la dinámica natural del suelo.

Las prácticas agrícolas pueden alterar las propiedades del suelo, estas alteraciones varían según las técnicas y los cultivos que se utilicen, pero pueden ser tanto positivas como negativas. Algunas técnicas agrícolas se conocen y practican desde la antigüedad, la alternancia de cultivos es una de ellas, que tiene importantes efectos en la producción y el suelo. Mediante las alternancias se rompen los ciclos de las enfermedades y plagas ya que no encuentran el huésped que necesitan, como demostraron Rodríguez-Kabana et al. (1990) en su investigación sobre rotaciones de sorgo y soja para reducir el impacto de las plagas de nematodos. Las rotaciones de cultivos también tienen efectos importantes en las características físicas del suelo, estas se ven alteradas por la cantidad y calidad de residuos vegetales que dejan los cultivos y por la gestión que se haga de ellos (Reeves, 1994). De igual modo que las alternancias de cultivos pueden tener estos efectos, la explotación continuada de monocultivos o rotaciones simples puede provocar cambios negativos en el suelo. Los estudios llevados a cabo en Canadá por Jarecki et al. (2018) sobre el rendimiento de cultivos de maíz-maíz frente a distintas rotaciones, como maíz-avena-alfalfa entre otras, a lo largo del tiempo mostraron como el rendimiento era mayor y más estable en las rotaciones, sobre todo en la de maíz-avena-alfalfa, y que el carbono orgánico aumentó en los cultivos con rotación frente a los de maíz-maíz. Otras rotaciones apuestan por la introducción de pastos en las zonas de cultivo, que aumentan a largo plazo la concentración de carbono orgánico en el suelo, consiguiéndose así mayor fertilidad y rendimiento (Grahmann, 2019). Los pastos aportan grandes beneficios en las rotaciones, debido a sus características de producción de biomasa y su distribución radicular que permiten reponer el contenido de materia orgánica (MO) del suelo (Forján, 2000).

La acidificación de los suelos es un proceso natural que se ve potenciado por las actividades humanas, como las emisiones de compuestos químicos que provocan lluvia ácida o la gestión de los cultivos que provocan una reducción del pH en el suelo (Noble et al, 2000). Se considera que un suelo es ácido cuando su pH es igual o inferior a 5.5, estos cambios en el pH son muy importantes ya que cuanto más se acidifica un suelo más cationes de base se pierden, reduciéndose la fertilidad. Si el pH desciende por debajo de 4,5 se produce la solubilización de los metales pesados tóxicos que puedan estar presentes en el suelo como el aluminio o el cadmio (Xu et al. 2019). Los efectos tóxicos de estos metales pesados varían según la especie vegetal y el estado del metal (Méndez et al. 2009), siendo el Al^{+3} especialmente tóxico para los cultivos a nivel fisiológico y molecular (Chaffai et al.

2005; Marín et al. 2010). Una práctica agrícola muy frecuente que aumenta la acidificación del suelo es el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, que al ser echados en exceso y a lo largo del tiempo liberan protones que provocan la acidificación (Qu et al, 2014). Para revertir la acidez del suelo se suelen implementar técnicas basadas en el encalado, así como el cultivo de especies resistentes a la acidez y un uso eficiente de los fertilizantes (Baligar y Fageria, 2008; FAO,2020).

La salinidad se refiere a la presencia de una alta concentración de sales en el suelo, esto es un problema para la vegetación por las condiciones de toxicidad y la reducción del potencial osmótico que provocan estas sales. Las sales más comunes son NaCl, pero es frecuente la combinación de los cationes Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} (Piedra y Cepero, 2013). El incremento de la salinidad en el suelo es un problema muy frecuente en las regiones áridas y semiáridas, en estos regímenes con bajas precipitaciones la rápida evaporación del agua facilita la acumulación de sales en las primeras capas del suelo, lo que provoca la salinización de las tierras de cultivo imposibilitando el desarrollo vegetal al aumentar el pH, la conductividad y la concentración de sales (Piedra y Cepero, 2013). La salinidad induce estrés hídrico por los bajos valores del potencial hídrico provocado por las sales que dificultan la absorción celular (Argentel et al, 2006), también da lugar a toxicidad específica si hay altas concentraciones de Cl^- que además provocan desbalance nutricional ya que reducen la captación de K^+ , NO_3^- , PO_4^- (Piedra y Cepero, 2013). La erosión es un proceso de origen natural y antrópico que afecta a la mayoría de las tierras de cultivo en el mundo, degradando los suelos y poniendo en riesgo la viabilidad de las cosechas (FAO, 2016). La erosión natural es lenta, producida por la acción del agua, el viento y la gravedad, mientras que la antrópica es rápida, alterando las dinámicas naturales entre el suelo y la erosión (Morgan, 2005). La agricultura es una de las principales fuentes de erosión antrópica (Morgan, 2005), destacan la labranza y los manejos en suelos desprotegidos como las prácticas más erosivas. La labranza altera la estructura del suelo al romper los agregados, también voltea y mezcla la capa superficial del suelo con las inferiores, alterando las dinámicas del suelo y la resistencia a la erosión (De Alba et al., 2011). El laboreo convencional tiene el objetivo de dificultar el desarrollo de vegetación no deseada (Forcella y Lindstrom, 1988) y de preparar el suelo para que los cultivos se desarrollen mejor en el suelo removido. La pérdida de estructura reduce también la infiltración, al disminuir el número de poros, con lo que la compactación aumenta (Francis, 1986). Estos efectos reducen la aireación y la cantidad de agua

disponible, dificultan el desarrollo radicular y facilitan la formación de costras superficiales asociadas a la erosión y a la pérdida de estructura (Bronick y Lal, 2005). Es frecuente que ciertas prácticas agrícolas como los monocultivos o barbechos blancos dejen el suelo sin cobertura, siendo vulnerable a la erosión sobre todo la producida por la precipitación (Francis, 1986). Las gotas de lluvia impactan sobre el suelo, rompiendo la estructura y formando una costra superficial impermeable que reduce la infiltración, lo cual agrava la escorrentía superficial que arrastra los sedimentos y provoca que se pierda la capa superficial del suelo y los nutrientes que contiene (Baker et al., 2008).

Para remediar los problemas y la erosión producida por estos manejos surgen prácticas que tienen por objetivo proteger el suelo de la erosión y mejorar la estructura, consiguiendo suelos más resistentes a los procesos erosivos (Baker et al. 2008). Los cultivos de cobertura buscan proteger el suelo con una cobertura vegetal que evite la erosión hídrica y eólica (Reeves, 1994), además estos cultivos depositan restos vegetales en el suelo aportando MO, la cual tiene un efecto positivo en la estructura y la infiltración del suelo (Ruiz-Colmenero et al, 2012) ya que facilita la formación de agregados y los hace más estables (Sainju et al. 2003). Las raíces de los cultivos de cobertura tienen efectos mejorantes en la porosidad e infiltración del suelo (Reeves, 1994), ya que agrandan los poros y crean canales por los que circula el agua y el aire, además las raíces aportan estabilidad y cohesión al suelo aumentando la resistencia a la erosión (Oades, 1984). La labranza de conservación es otro manejo utilizado para reducir la erosión y conservar el suelo, para ello se evita la labranza de la capa superficial del suelo consiguiendo que las propiedades físicas del suelo se mantengan inalteradas (Baker et al. 2008), se dejan los restos de los cultivos anteriores para que actúen como cobertura y fuente de MO. Las técnicas basadas en la siembra directa aumentan la biomasa microbiana, el contenido en C y N mineralizables en las capas superficiales del suelo según los estudios realizados por Salinas-García et al (1997), mientras que otros como Forján y Manso (2016) afirman que el arado convencional aumenta la mineralización de la MO en el suelo frente a la siembra directa. Sin embargo, hay otros autores como Molina et al. (2012) cuyos experimentos mostraron una mayor retención del agua en la labranza reducida que en la convencional y que en la labranza cero.

La disminución de la fertilidad química de los suelos parece estar relacionada con los bajos rendimientos a raíz de largos periodos de cultivo (Forján y Manso, 2016), para compensar las pérdidas de nutrientes y la reducción del rendimiento es

frecuente el uso de fertilizantes químicos. Estos fertilizantes aportan nutrientes esenciales como N, S y P, compensando las pérdidas y carencias que puedan tener los cultivos, aunque su uso resulta problemático cuando se abona en exceso. Los fertilizantes nitrogenados como el sulfato de amonio o la urea son responsables de la acidificación antrópica del suelo (Bolan et al. 2005), provocando la reducción de la actividad microbiana, de la capacidad de intercambio catiónico, el descenso de nutrientes básicos como Ca, Na y K y la toxicidad de elementos metálicos como el Al^{+3} (Tahir Ata-UI-Karim et al, 2020). La acidificación del medio altera la relación $N_2O/(N_2+N_2O)$ del suelo, dando lugar a un aumento de las emisiones de N_2O del suelo (Qu et al, 2014). Para revertir y mitigar la acidez del suelo se utilizan diversas prácticas agrícolas, siendo el encalado la más común. El encalado consiste en el uso de materiales alcalinos, principalmente Ca, para aumentar el pH del suelo y evitar así los efectos negativos de la acidez en el suelo.

El agua es fundamental para el desarrollo vegetal siendo un factor limitante en la mayoría de los cultivos sobre todo en regiones áridas y semiáridas (Mazuela, 2013). Las prácticas agrícolas pueden alterar las dinámicas del suelo que regulan el ciclo hidrológico. Por ejemplo, los manejos que provocan compactación, pérdida de estructura y erosión como son la labranza convencional (De Alba et al., 2011) reducen también la infiltración del suelo y por tanto el agua disponible en el suelo (Morgan, 2005). Las prácticas de conservación actúan protegiendo el suelo de la erosión y mejorando la estructura y la infiltración. Los cultivos de cobertura (García-Fayos, 2004), la labranza de conservación (Baker et al., 2008) o el cultivo en terrazas (FAO, 2005) son algunas de prácticas que permiten proteger el suelo al mismo tiempo que aumentan el agua disponible para los cultivos.

Los estudios e informes sobre el cambio climático (CC) muestran como alterará el clima a medio y largo plazo, la agricultura a nivel mundial se verá afectada de distintas formas por lo que diferentes medidas y manejos se deberán implementar para compensar los problemas que se produzcan. El CC provocará aumentos de temperaturas en todo el planeta, los cuales serán beneficiosos en las latitudes más altas ya que tendrán inviernos más suaves con periodos de cosechas más largos (Olesen y Bindi, 2002). En las latitudes más cálidas la mayor temperatura tendrá efectos perjudiciales ya que los cultivos necesitarán mayor aporte de agua para compensar las nuevas tasas de evaporación (Nelson et al., 2009). Se prevé que el aumento de temperatura facilite el desarrollo y distribución de plagas, así como un aumento de los eventos extremos como tormentas y sequías (IPCC, 2007). La

agricultura tendrá que adaptarse a condiciones cada vez más variables, apostando por manejos que protejan el suelo, conserven sus propiedades fisicoquímicas y sean sostenibles.

A partir de los datos, observaciones y estudios planteados se constata la importancia de una correcta gestión de los cultivos para garantizar su sostenibilidad y unas mejores producciones a largo plazo. El objetivo de este trabajo es analizar como la gestión agrícola afecta al suelo, estudiando los distintos impactos que produce tanto positivos como negativos y conseguir de esta forma una mayor comprensión de esta problemática. Mediante una revisión bibliográfica de artículos y publicaciones científicas se estudiarán las alteraciones del suelo provocadas por las prácticas agrarias.

3. Metodología

El siguiente apartado consiste en el desarrollo y planteamiento de los procedimientos de búsqueda utilizados en este trabajo de revisión bibliográfica. Las búsquedas se han realizado utilizando diversos medios como el portal electrónico *Web of Science* y el portal electrónico de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el metabuscador Google Académico y la base de datos de la Biblioteca de la Universidad de Alcalá (BUAH). Tanto el español como el inglés han sido los principales idiomas de la bibliografía revisada, excluyéndose aquellos idiomas que no fuesen estos.

Las primeras búsquedas tenían el objetivo de conocer el estado general del tema y de las investigaciones realizadas en el campo. Para ello se buscaron informes de la FAO sobre el estado de la agricultura y el suelo, así como búsquedas en *Web of Science* con descriptores como "*crop rotation*" AND "*organic matter*", "rotación de cultivos", "*agricultural management*". Tras la primera búsqueda se establecen los temas en los que se centrará el trabajo, concretando la segunda búsqueda a cuestiones más precisas relacionadas con la revisión. En esta búsqueda más exhaustiva se utiliza el buscador *Web of Science*, la base de datos BUAH y Google Académico.

La última búsqueda bibliográfica utilizó las referencias y bibliografías de los artículos y libros revisados en la primera y segunda búsqueda, permitiendo profundizar en los temas más concretos y específicos. Mediante esta última etapa se concluye la búsqueda de la bibliografía, contando con un total de 33 artículos de revistas científicas y libros revisados.

4. Resultados

4.1. El papel de la materia orgánica del suelo.

El suelo está formado por minerales, microorganismos, agua y aire, así como materia orgánica. Esta materia orgánica está compuesta por los residuos orgánicos en descomposición de origen vegetal, que se acumulan en el suelo. Es un componente del suelo muy importante ya que se utiliza como indicador de calidad y sostenibilidad en estudios agronómicos (Suñer y Galantini, 2008), este uso se debe a su relación con las propiedades e indicadores físicos, químicos y biológicos. La sostenibilidad y fertilidad de los cultivos dependen de que la materia orgánica del suelo se encuentre en niveles óptimos para el desarrollo vegetal, tratando de evitar su disminución ya que diversas prácticas agrícolas pueden provocar el aumento o disminución de la materia orgánica. La composición de la materia orgánica del suelo (MOS) es fundamentalmente C, H, O, N, P, S en cantidades variables, siendo el carbono orgánico el principal elemento de la materia orgánica. El carbono presente en el suelo puede estar en forma orgánica o inorgánica. En la forma inorgánica el carbono es más estable al encontrarse como carbonatos insolubles principalmente ($-\text{CO}_3$), (FAO, 2001). La fracción orgánica del carbono en el suelo se encuentra en forma de residuos orgánicos, provenientes principalmente de la descomposición del materia vegetal, así como de los microorganismos edáficos, se encuentra también en formas muy condensadas próximas al C elemental (Martínez et al. 2008). El carbono orgánico del suelo (COS) presenta un balance entre la materia orgánica que recibe el suelo y el C que se pierde por procesos como la erosión, la lixiviación y el C que se transforma en CO_2 en los procesos de mineralización de la materia orgánica. La MOS también cuenta con una fracción microbiana llamada biomasa microbiana, la cual supone entre el 1% y el 5% del total y es una fracción importante sobre todo por su relación con la fertilidad (Sanderman y Amundson, 2003, Yadvinder-Singh et al. 2005) al ser susceptible a las prácticas agrícolas y actuar como reserva de nutrientes. La MOS se relaciona con la fertilidad del suelo ya que es una fuente de nutrientes esenciales como N, P, S entre otros (FAO, 2017), por lo que condiciona el desarrollo vegetal y su productividad (Sanderman y Amundsen, 2003).

Las rotaciones de cultivos han demostrado su utilidad para mantener o aumentar el COS y como consecuencia aumentar el rendimiento agrario frente a los monocultivos (Jarecki et al. 2018). Mediante las rotaciones de cultivos se aumenta la calidad y diversidad de residuos ya que se introducen otras especies vegetales con producción y calidad de residuos diferentes a la del cultivo principal. Esta

diversificación favorece el mantenimiento o aumento del COS, y por tanto también de la fertilidad, mientras que los monocultivos o las rotaciones simples de dos especies provocan una disminución del COS ya que se extrae más C del que devuelven los cultivos. Los residuos del monocultivo, con frecuencia no son suficientes para mantener el C que se mineraliza durante el tiempo que dura el cultivo, agotándose la fertilidad del suelo y esquilmandose los otros nutrientes que haya en el suelo, dando lugar a la pérdida de rendimiento y en última instancia a la imposibilidad del desarrollo del cultivo.

La estructura del suelo es una de las propiedades físicas fuertemente relacionada con el COS. Los agregados del suelo muestran una mayor estabilidad cuanto mayores son las concentraciones de COS (Martínez et al. 2008) ya que se establecen uniones entre las partículas del suelo y la MO.

La agricultura afecta al equilibrio natural de la materia orgánica en el suelo, estos cambios afectan también a la estructura del suelo debido a su estrecha relación con el COS. Esta situación provoca que en aquellos sistemas agrarios con un balance deficitario de COS la estructura del suelo se degrade (Villamil et al. 2006), alterándose también la circulación del agua en el suelo, la aireación y la facilidad del desarrollo radicular. Por el contrario, cuando aumente el COS la estabilidad estructural aumentará, manteniéndose unas propiedades físicas correctas que evitarán la degradación del suelo. Diversos autores como Villamil et al. (2006), Studdert et al. (1997) y Sainju et al. (2003) señalan que las rotaciones de cultivos y los cultivos de cobertura pueden mejorar la estructura del suelo al aumentar el COS respecto al monocultivo.

Para el correcto desarrollo vegetal y agrícola es necesario que el suelo presente una fertilidad que permita el desarrollo vegetal. La fertilidad se relaciona con la MOS, las propiedades físicas del suelo, la actividad microbiana y los nutrientes esenciales. Estos nutrientes son tanto macronutrientes como N, P, S, Ca, Mg y K, como micronutrientes Fe, B, Cl, Zn, Mn, Cu y Mo.

4.2. El fósforo.

El fósforo es un elemento fundamental para el desarrollo vegetal, este se encuentra en el suelo en proporciones y condiciones variables, aunque casi siempre en cantidades pequeñas. La mayor parte del fósforo del suelo está en formas insolubles que las plantas no pueden aprovechar. Presenta tres fracciones que son el P no lábil, el P lábil y el P soluble que se encuentra en la solución del suelo. La mayor parte del P se encuentra en la forma no lábil y es inaccesible para las plantas, está formado por fosfatos minerales primarios, humus rico en P, fósforo

unido a óxidos y silicatos, y los fosfatos insolubles de Ca, Fe y Al. El fósforo lábil está formado por una fracción más soluble que la no lábil y presenta equilibrio con la disolución del suelo, está compuesto por precipitados de P y el P adherido a la superficie del complejo de cambio del suelo. El P soluble del suelo es la fracción más pequeña de las tres, la forman los aniones ortofosfóricos solubles monovalentes (H_2PO_4) y divalentes (HPO_4), los cuales pueden ser absorbidos por las raíces de las plantas.

El cultivo reiterado puede disminuir la cantidad de fósforo soluble disponible para el desarrollo vegetal. Para remediar esta pérdida de P es necesario recurrir a la aplicación de fertilizantes fosfatados. La fertilización en cantidades correctas que suplan el déficit de P es una forma útil y eficaz de garantizar la viabilidad de los cultivos y mantener el rendimiento. Sin embargo, cuando las cantidades de fertilizante son superiores a las que los cultivos necesitan el P se acumula en el suelo. Una parte de este P en exceso se integra en el suelo uniéndose a la MO y las arcillas, pero otra parte es removida por la lluvia que lo arrastra fuera del cultivo y puede llegar a masas de agua, donde se puede producir la eutrofización por este aporte excesivo de P.

4.3. El Nitrógeno.

El nitrógeno es uno de los macronutrientes más importantes para el desarrollo vegetal, ya que es un constituyente de los aminoácidos vegetales, y por tanto de las proteínas. El N del suelo en condiciones naturales se encuentra en equilibrio entre las pérdidas y ganancias que se producen. Las ganancias se deben a la deposición de N atmosférico, la mineralización de la MO y por la fijación microbiana del N, mientras que las pérdidas se deben al lixiviado, la absorción por parte de las plantas, a la acción de bacterias desnitrificantes, a las pérdidas por erosión (fundamentalmente en el agua de escorrentía) y las emisiones de gases nitrosos (NO_x) a la atmósfera. El N presente en el suelo se encuentra principalmente en formas orgánicas. Entre las formas inorgánicas, la mayoritaria es el NH_4^+ el cual se halla fijado en las arcillas y a la materia orgánica del suelo. Los nitratos (NO_3^-) no quedan fijados al suelo, por lo que se pierden rápidamente por lixiviación o escorrentía. De la reserva total del N en el suelo un gran aporte viene de la mineralización del N orgánico. Estas formas químicas inorgánicas son las que las plantas pueden absorber. Los residuos vegetales y animales son una fuente de N, al descomponerse se liberan los nutrientes que los formaban aportando C, N y otros minerales al suelo. Para mantener un nivel de N suficiente para obtener unos rendimientos rentables del cultivo es necesario el uso de fertilizantes nitrogenados,

que pueden ser inorgánicos u orgánicos.

Las prácticas agrícolas tienen diversos efectos sobre el N en el suelo, según cuales sean se puede favorecer la pérdida de nitrógeno o su aumento y conservación. La recolecta de los cultivos cosechados es una de las vías por las que el suelo pierde N (Legg y Meisinger, 1982). Esto se debe a que el material vegetal recogido abandona el sistema agrario sin depositarse ni volver al suelo el N utilizado en su desarrollo. Este N volverá al medio en otro lugar provocando una alteración en la dinámica del N en el cultivo, que perderá con cada nueva cosecha una parte del N, por lo que para mantener el equilibrio se deberá aportar N al cultivo que compense el N extraído. De aquí la necesidad del uso de fertilizantes para compensar las pérdidas de N. Al tener mayor cantidad de N disponible los cultivos se desarrollan más ya que deja de ser un factor limitante y aumenta el rendimiento. Un mayor rendimiento también implica una mayor cantidad de residuos que se depositan en el suelo (Halvorson et al. 1999), devolviendo así parte del N y del C extraído al suelo. El uso de fertilizantes nitrogenados excesivo provoca un aumento de la acidez y un descenso de la eficacia del fertilizante (Barak et al. 1997) al utilizarse una cantidad mayor de la que pueden absorber las plantas.

La utilización de cultivos de cobertura es una forma de mantener el N del suelo sin depender de fertilizantes (Sainju et al. 2003), estos cultivos reducen la lixiviación del N al captar este N, además aportan mayores cantidades de residuos vegetales que devuelven el C y el N al suelo. Si se utilizan leguminosas en los cultivos de cobertura el N total presenta una mejoría respecto aquellos cultivos sin presencia de leguminosas (Coombasa et al. 2017). Esta mejora se debe a la simbiosis que presentan las leguminosas con el género *Rhizobium*, el cual fija N atmosférico acumulándolo como N orgánico en sus nódulos, y cuando estos nódulos se descomponen, se libera N que puede ser tomado por el siguiente cultivo de la rotación. En consecuencia, estas rotaciones con leguminosas permiten reducir la cantidad de fertilizante nitrogenado necesario ya que aportan N a los cultivos posteriores.

4.4. Importancia del pH del suelo.

El pH del suelo es un factor muy relevante ya que se puede utilizar como indicador de la disponibilidad de los nutrientes para su absorción por parte de las plantas y los microorganismos. El pH afecta a la solubilidad, disponibilidad y movilidad de los elementos presentes en el suelo, si se trata de un medio ácido el número de cargas positivas del complejo de cambio aumenta (capacidad de intercambio aniónico) provocando la fijación de los aniones, los cuales quedan adheridos a la superficie

de las arcillas. Por el contrario, si el pH tiende a neutro o es alcalino el complejo absorbente retendrá los cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ mientras que los cationes como el Al^{3+} estarán precipitados. La mayor capacidad de fijación la presentan los oxihidróxidos de hierro y de aluminio junto con la materia orgánica, que por su alto contenido en cargas negativas fijan los cationes y a $\text{pH} \leq 5$ pueden provocar carencias de nutrientes.

La acidificación puede deberse a causas naturales y/o antrópicas. Las principales causas naturales son por la acción del clima, por la materia orgánica y por la roca madre. Los fertilizantes nitrogenados como la urea, el nitrato amónico o el sulfato de amonio provocan la acidificación del suelo mediante la nitrificación, a la cual sigue la pérdida de NO_3^- por lixiviación (Bolan et al. 2005). Esta acidificación provoca una pérdida de bases disminuyendo la saturación de bases del complejo de cambio. Entre los fertilizantes nitrogenados la urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) presenta un gran potencial acidificador puesto que todo el N que contiene pasa a NH_4^+ , el cual en la nitrificación liberará protones (H^+). El uso de fertilizantes no implica que siempre haya acidificación, ya que los procesos de regulación del suelo y la materia orgánica ayudan a mantener el equilibrio natural del suelo al neutralizar parte de las reacciones. El problema se produce con el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados en periodos largos, ya que la adición continuada acaba superando el equilibrio natural y se produce el viraje hacia un medio ácido.

La mayoría de los cultivos por lo general necesitan un pH en torno a 6,5-7 para estar en condiciones óptimas, si se produce un cambio de pH hacia condiciones ácidas los elementos como el Ca, K, P, Mg precipitan y dejan de estar disponibles para que las plantas los absorban, al mismo tiempo micronutrientes como el Al, Fe, Mn, Cu y Zn se solubilizan en estas condiciones ácidas por lo que pueden ser absorbidos por las plantas. Aunque la solubilización de los micronutrientes permite a las plantas absorber elementos necesarios para su desarrollo, los compuestos orgánicos e inorgánicos de Al se disocian para compensar el descenso de pH. Este descenso provoca una mayor movilización de los compuestos inorgánicos monoméricos de Al y la solubilización en su forma trivalente Al^{3+} el cual resulta tóxico para las plantas. La toxicidad del Al^{3+} varía según la tolerancia de la especie vegetal, la concentración del Al^{3+} en el suelo y las características del suelo (Rivera et al. 2016). La toxicidad del aluminio también afecta a las raíces de las plantas ya que inhibe su desarrollo y crecimiento (Chaffai et al. 2005) al afectar a los procesos de división celular en los meristemas apicales de las raíces. Esta situación provoca un descenso en la capacidad de absorber agua y nutrientes, interfiriendo en el

correcto desarrollo vegetal.

En condiciones ácidas la actividad microbiana tiende a sufrir una disminución, por lo que también lo hace la mineralización de la materia orgánica, provocando que haya menos recursos para las plantas y mayores reservas de MO sin alterar en el suelo. Ya se ha señalado que la acidificación provoca una reducción de los elementos que basifican el suelo, estos cationes Ca, K, y Na son fundamentales para el desarrollo vegetal. Que los cultivos no puedan absorberlos del suelo o lo hagan en cantidades inferiores a las necesarias supone una pérdida de fertilidad que de mantenerse en el tiempo imposibilita el desarrollo vegetal.

Cuando el pH de un suelo agrícola desciende hasta ser ácido se pueden realizar prácticas agrícolas que reviertan esta situación, tornando el pH del suelo hacia la neutralidad, la práctica más habitual consiste en el encalado. El encalado consiste en la aplicación de materiales alcalinos al suelo, con el fin de aumentar el pH y reducir los efectos negativos de un pH ácido en el suelo. Al cambiar el pH y perderse la acidez, la saturación en bases aumenta, así como la disponibilidad del Ca^{2+} y el Mg^{2+} , mientras que el Al^{3+} disminuye perdiendo su toxicidad. La reducción de la acidez se produce al reaccionar los elementos básicos aplicados al suelo, suelen ser Ca y, en menor medida Mg, en forma de carbonatos como CaCO_3 , $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$. La reacción consiste en que los elementos alcalinos desplazan el H^+ de los grupos de cambio formándose HCO_3^- , tras la primera transformación el HCO_3^- reacciona con el H^+ formándose CO_2 y H_2O , provocando el aumento del pH del suelo. El encalado provoca la liberación del fósforo soluble, que en condiciones ácidas se encuentra inmovilizado, aumentando la disponibilidad de este nutriente para las plantas. La aplicación del encalado reactiva la actividad microbiana y al mismo tiempo detiene la solubilización de los metales pesados presentes en el medio. El encalado en exceso da lugar al viraje del pH hacia la alcalinidad, esto provoca que los minerales como Fe, Mn, Zn, Cu y B dejen de estar disponibles conforme se basifica el medio (Baligar y Fageria, 2008), ya que en condiciones básicas precipitan, provocando que las plantas sean incapaces de captar estos minerales del suelo y sufran una deficiencia.

4.5. La capacidad de intercambio catiónico.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) mide la capacidad de un suelo de retener cationes intercambiables, lo cual sirve de indicador para conocer las cargas negativas presentes por unidad de masa del suelo (Krull et al. 2004). Una capacidad de intercambio catiónico elevada se considera positiva para el suelo ya que implica que dispone de una mayor capacidad para retener de cationes tales

como Ca, Mg, Na y K, los cuales son necesarios para el desarrollo vegetal. La CIC del suelo depende del contenido en MO y de coloides inorgánicos (arcillas y óxidos) que presente ese suelo, ya que los grupos carboxílicos del COS presentan cargas negativas que reaccionan uniéndose mediante enlaces débiles con los cationes, mientras que las arcillas presentan cargas negativas pero los enlaces que establecen con los cationes son más fuertes y estables. Según el tipo de arcilla los enlaces y sus interacciones varían siendo las vermiculitas, esmécticas y las montmorillonitas las que presentan mayor CIC.

Los suelos suelen presentar dos CIC, una total y otra variable (Krull et al. 2004). La CIC total es constante y no depende del pH, la carga permanente del suelo no se ve afectada por el pH o los cambios en la solución del suelo, ya que esta carga se debe a la estructura tetraédrica y octaédrica de las arcillas donde se producen sustituciones isomorfas entre los cationes estructurales y los del medio. Esta irregularidad en la estructura es lo que confiere la carga negativa permanente de ciertas arcillas. La carga variable del suelo proviene de óxidos de Al y Fe, de los grupos carboxílicos y OH⁻ de la materia orgánica, así como de algunas arcillas como caolinitas, esmécticas y vermiculitas (Kamprath y Smyth, 2005). La materia orgánica es uno de los principales contribuyentes a la CIC variable de un suelo. Las arcillas, aunque pueden aportar carga variable dependen de que se encuentren los tipos de arcillas concretas que contribuyen a la CIC por lo que su importancia depende de cada suelo.

La CIC es susceptible de verse afectada según las prácticas agrícolas que se realicen, variando la cantidad y disponibilidad de la MO y alterando el pH del suelo. La CIC de los suelos agrícolas con déficit de MO será menor que en aquellos donde la materia orgánica presente niveles altos (Kaiser et al. 2008). Las prácticas agrícolas que fomenten un aumento de la MO, como rotaciones de cultivo o cultivos de cobertura entre otros, aumentarán la CIC de ese suelo y la fertilidad al tener una mayor capacidad de retener cationes disponibles para la absorción vegetal. Los cambios en el pH del suelo también afectan a la CIC, ya que si se acidifica el suelo se puede inducir una reducción de la CIC producida por la MO (Villavicencio et al. 2011), ya que la MO se ve influenciada por el pH. A partir de un pH < 5 la CIC producida por la MO se reduce, ya que en condiciones ácidas los cationes precipitan y las zonas con carga negativa de los grupos carboxílicos quedan unidas al Fe y Al que se vuelven más afines que los cationes Ca, Na, K y Mg.

4.6. Salinización inducida por los cultivos.

La salinización del suelo es el proceso por el cual se acumulan sales solubles en

el suelo por encima del nivel límite de toxicidad. Estas sales están compuestas principalmente por los cationes Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} y los aniones Cl^- , SO_4 , HCO_3^- y CO_3^{2-} . Puede haber salinidad natural por la infiltración de aguas marinas o por el aporte de sales de la roca madre del suelo, aunque la problemática principal en torno a la salinidad de las tierras de cultivo es de origen humano. Las fuentes antrópicas son fundamentalmente el agua de riego y el uso de fertilizantes (Villavivencio et al.2011). Al regarse los cultivos las plantas absorben el agua o esta se evapora dejando las sales que contenía en el suelo. Si estas sales no se remueven del suelo y se depositan en el, la concentración en sales del suelo irá aumentando conforme se repita el proceso. Este proceso se ve favorecido si se utilizan aguas de baja calidad que presenten un alto contenido en sales. Si el suelo tiene un mal sistema de drenaje no tendrá lugar el lavado del excedente de sales. La rápida evaporación del agua es problemática ya que conforme se evapora más agua más sales se depositan en el suelo, este proceso se agrava en los climas áridos y semiáridos (Piedra y Cepero, 2013) por su alto índice de evaporación. Estas regiones de climas áridos suelen presentar déficits hídricos, lo cual dificulta el lavado del suelo para reducir la salinidad.

Los fertilizantes también pueden aumentar la concentración de sales en el suelo, ya que son una fuente de sales minerales que pueden almacenarse en el suelo si se aplican mayores cantidades de fertilizante de las que requieren los cultivos. Si la fertilización en exceso se mantiene en el tiempo, la concentración de sales aumentará progresivamente pudiendo generar salinidad. Para evitar este problema es conveniente ajustar las dosis de fertilizante a las necesidades del cultivo, sin exceder los requerimientos.

La salinidad provoca una reducción del potencial osmótico, disfunciones nutricionales en los cultivos y en el rendimiento, además el desarrollo de los cultivos se reduce y se puede producir toxicidad por algunos iones (Läuchli y Grattan, 2007). Las células vegetales al estar en un medio salino liberan el agua de su interior para compensar el medio hipertónico, esto provoca la deshidratación y una reducción del tamaño. El estrés hídrico provoca una reducción de la elongación celular y, por tanto, aunque en menor medida, un descenso de la división celular. Este descenso en la división celular da lugar a un crecimiento más lento en las plantas con estrés salino. Que el gradiente del suelo sea menor que el de la planta provoca a nivel osmótico la misma situación que si no hubiese agua en el medio, ya que esta no está disponible para la absorción vegetal. La combinación del estrés hídrico y osmótico reduce el desarrollo y el rendimiento de

los cultivos, pudiendo provocar la muerte, según la tolerancia al estrés de cada especie, por tanto, es una problemática importante para los cultivos. Ciertos iones como Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} pueden concentrarse en el medio y ser tóxicos para las plantas que los absorben, variando sus efectos con la concentración. Las sales son transportadas hacia las hojas, donde se concentran en mayor medida en las hojas más viejas. Las hojas acaban muriendo por la concentración de sales, lo cual disminuye la superficie fotosintética de la planta si no hay una tasa de reposición de las hojas mayor que las pérdidas por salinidad. Además de provocar toxicidad el Na^+ compite por la absorción del K^+ en las raíces de las plantas, por lo que al encontrarse en exceso impide la absorción del potasio, alterando la actividad enzimática y la síntesis de proteínas. La toxicidad de estos iones se produce a altas concentraciones, ya que son micronutrientes esenciales para el desarrollo vegetal.

4.7. El problema de la erosión.

La erosión del suelo es un proceso natural y lento por el cual la superficie del suelo es removida, produciéndose degradación del suelo. La pérdida de suelo se produce por la pérdida de material de la capa superficial del suelo, donde se concentra la mayor parte de la MO y los nutrientes del suelo. Esta pérdida afecta negativamente a las plantas ya que se pierden los nutrientes necesarios para el desarrollo vegetal. La erosión se produce por la acción de agentes naturales como el agua, el viento y por la acción humana (laboreo).

El relieve es un factor geográfico que, según la forma, la longitud de las pendientes y el ángulo que presenten incidirán de una forma u otra en los procesos erosivos (Tayupanta, 1993). Las pendientes aumentan la erosión conforme son más largas ya que la escorrentía aumenta su velocidad desde el inicio de la pendiente hacia el final de esta, por tanto, los cultivos en zonas de pendiente sufrirán procesos erosivos más graves conforme aumente la pendiente. La precipitación es un factor climático que incide en la erosión (De Alba et al. 2011), esta incidencia varía con la intensidad, la distribución en el tiempo, la duración y la frecuencia de la lluvia. La escorrentía superficial se produce a partir de la precipitación. La escorrentía puede manifestarse como una lámina de agua cuando el sustrato está saturado o como fuertes corrientes de agua en zonas con pendiente que erosionan el suelo formando regueros o cárcavas. La erosión del suelo varía según la composición y los materiales que presente (Morgan, 2005).

La agricultura es una de las principales causas de erosión antrópica en el suelo (Morgan, 2005). Las distintas prácticas agrícolas y el medio en el que se lleven a cabo condicionarán la intensidad de los procesos erosivos. La labranza produce

un importante efecto en el suelo ya que altera su estructura superficial y deshace los agregados, debilitando la resistencia a la erosión. Con la pérdida de la estructura se produce la formación de una costra superficial al rellenarse los poros del suelo con las partículas pequeñas del suelo tras la destrucción de los agregados, la costra es más dura y espesa que los materiales inferiores y reduce la infiltración al mismo tiempo que dificulta el desarrollo de las plantas. La labranza si se realiza en terrenos con pendiente provoca distintos resultados según la orientación de los surcos. Los surcos a favor de la pendiente actúan como canales para la escorrentía, dando lugar a una mayor erosión en los surcos, pero reduce su efecto en el resto del terreno. La labranza perpendicular a la pendiente favorece la infiltración y reduce la escorrentía, ya que los canales por su distribución funcionan como diques que contienen la escorrentía y permiten que vaya infiltrándose progresivamente (De Alba et al. 2011). Sin embargo, esta orientación de los surcos perpendicular a la pendiente puede aumentar drásticamente la erosión si la precipitación es muy intensa y los “diques” de los surcos se rompen y desbordan. Este desbordamiento o rotura de las barreras de los surcos provoca que una mayor cantidad de agua circule con mayor potencial erosivo del que poseía de forma natural, provocando un efecto en cadena en los “diques” siguientes y el consecuente aumento de la erosión.

La erosión en las tierras de cultivo se ve agravada en aquellos terrenos que presenten suelo desprotegido, es decir, un suelo con escasa vegetación o sin cubierta vegetal lo que provoca que estén expuestos a la erosión producida por la precipitación y la escorrentía. Los suelos sin vegetación carecen de las mejoras en la textura, infiltración y la resistencia a la erosión que produce la vegetación, provocando que los procesos erosivos se agraven más. Los cultivos en hilera suelen aportar una cobertura insuficiente por su disposición. En las hileras entre cultivos el suelo está expuesto a la erosión al estar carente de vegetación, siendo más propenso a la degradación. Los cultivos leñosos sometidos a prácticas tradicionales suelen sufrir importantes procesos erosivos por el laboreo reiterado al que se somete el suelo.

Especies como la vid, el olivo y el almendro son de cultivos leñosos mediterráneos asociados a estos procesos de intensa erosión del suelo. La erosión se intensifica por el arado continuado y frecuente de la tierra para evitar el desarrollo de vegetación no deseada. Al imposibilitarse el desarrollo de otras plantas la cobertura vegetal es nula por lo que la erosión es muy elevada. Al tratarse de cultivos leñosos que pueden alcanzar alturas considerables en el caso de los frutales, hay que

destacar la erosión por salpicadura. Esta se produce cuando el árbol intercepta la lluvia y la concentra en las hojas y ramas formando gotas de mayor tamaño, las cuales precipitan desde las copas y según la altura que haya pueden presentar mayor energía cinética que con la precipitación originaria, provocando una erosión por salpicadura mayor que la provocada por la lluvia sin interceptar. La distribución de los cultivos leñosos dentro de las parcelas también afecta a la cobertura vegetal ya que se suelen plantar separados para que las copas de los árboles se desarrollen sin competir entre sí, dando lugar a una cobertura escasa y dispersa. Es frecuente que estos cultivos se ubiquen en zonas de laderas que contribuyen negativamente a la erosión del suelo.

Otra fuente de erosión antrópica son los barbechos blancos en los que se deja una parcela de tierra sin cultivar durante los periodos otoñales e invernales, en los que las precipitaciones son más abundantes e intensas y la vegetación autóctona apenas cubre el suelo desde su abandono. Esta práctica es especialmente grave en los cultivos de secano mediterráneos por la excepcionalidad de las precipitaciones y las características de los suelos que son vulnerables a la erosión por su bajo contenido en MO.

4.8. Erosión por laboreo.

La erosión mecánica, también llamada erosión por laboreo (De Alba et al. 2011), es de origen antrópico y se produce por las acciones agrícolas relacionadas con el arado y laboreo del suelo. El laboreo convencional conlleva el volteo del suelo mediante el uso de arados, con el objetivo de preparar el suelo para la siembra, controlar la vegetación no deseada y la incorporación de los restos vegetales a las capas inferiores de suelo. El control de la vegetación arvense provoca que las zonas de cultivo carezcan de cobertura vegetal hasta que se desarrollan los cultivos, siendo mientras un suelo muy expuesto a la erosión. El volteo rompe la capa superficial del suelo exponiendo los horizontes inferiores que se degradan al moverse hacia los estratos superiores, mientras que la MO superficial queda enterrada en los horizontes inferiores donde se inmovilizan los nutrientes. Al mismo tiempo se destruyen la estructura y los agregados, provocando que el suelo sea vulnerable a la erosión. Los materiales desagregados son fácilmente movilizados y al no tener cobertura protectora, el suelo es susceptible de compactarse por la acción de la lluvia, al rellenar los materiales finos los poros del suelo formando una capa superficial impermeable (encostramiento).

En las zonas convexas de los cultivos se produce la pérdida del suelo al moverse hacia zonas bajas, mientras que en los relieves cóncavos tienden a acumularse

materiales desplazados de las partes con pendiente. Estas movilizaciones dan lugar a una alteración del relieve provocando a medio y largo plazo que la superficie del suelo se nivele suavizándose las pendientes. En las zonas convexas el laboreo continuo y la remoción de las capas superficiales del suelo provocan que horizontes inferiores con escasa fertilidad sean incorporados a las capas superficiales. Por el contrario, las zonas cóncavas al ser receptoras de materiales tienden a desarrollar horizontes ricos en nutrientes, siendo más fértiles que las convexas. En las zonas llanas donde se realiza el laboreo la movilización del suelo se produce de forma más homogénea, sin que haya una acumulación de materiales predominante, por lo que la movilización no es apreciable.

4.9. Compactación del suelo.

Las rodadas sucesivas de tractores y arados por el suelo labrado provocan la compactación del suelo (Soane y van Ouwerkerk, 1994). La compactación provoca un aumento de la densidad aparente y de la resistencia a la penetración del suelo (Bogunovica et al. 2018). La compactación produce un descenso de la infiltración, resultando en una disminución del agua disponible para los cultivos. El descenso en la infiltración potencia la erosión hídrica, ya que una mayor cantidad de agua pasa a formar parte de la escorrentía superficial. La compactación al mismo tiempo dificulta el desarrollo radicular (Unger y Kaspar, 1994), al reducirse el tamaño y número de poros las raíces tienen más dificultades para explorar los horizontes edáficos, lo que provoca una menor accesibilidad a los nutrientes en capas inferiores del suelo. Por último, la compactación reduce la aireación del suelo pudiendo desarrollarse condiciones anaeróbicas, las cuales dificultan el desarrollo de la biota edáfica.

4.10. Empleo de cubiertas vegetales y acolchados.

Para reducir y compensar la erosión asociada a la agricultura hay una serie de prácticas y técnicas que se pueden implementar con el fin de garantizar la continuidad de los cultivos y su sostenibilidad. El uso de cultivos de cobertura es una práctica fundamental para amortiguar el impacto de la erosión y proteger el suelo. Los cultivos de cobertura consisten en cultivos con un desarrollo rápido, tienen buena cobertura del suelo (Reeves, 1994). Además, se busca que mejoren la calidad del suelo aportando N y C en forma de residuos, que mejoren la textura y la infiltración del suelo, o que reduzcan la incidencia de las plagas. El desarrollo rápido es importante ya que en muchos casos son cultivos que se plantan entre temporadas cuando el cultivo principal no se cultiva o durante los barbechos por lo

que una especie vegetal con un desarrollo lento no es funcional. Se desea que la cobertura del suelo sea alta para que el cultivo cubra el máximo posible del terreno de forma que absorba la energía cinética de la lluvia, evitando que las gotas erosionen el suelo.

Los cultivos de cobertura al mismo tiempo actúan en el suelo, mediante las raíces que aumentan la cohesión del suelo y unen las partículas del suelo entre sí (García-Fayos, 2004), mejorando la estructura del suelo y la estabilidad de los agregados. La mejora de la estructura y la acción de las raíces, que agrandan los canales del suelo, dan lugar a un aumento de la infiltración. Esta mayor infiltración junto a la reducción de la velocidad de la escorrentía superficial reduce la erosión y aumenta el agua disponible en el suelo. Es importante que haya un equilibrio entre la precipitación que intercepta el cultivo y la erosión tolerable (Belmonte et al. 1999), ya que los cultivos de cobertura absorben parte de precipitación de forma proporcional a su cobertura, por lo que valores altos de cobertura provocan una reducción de la disponibilidad hídrica que puede afectar al desarrollo vegetal de forma más negativa que la erosión.

Las coberturas permiten mantener la humedad del suelo al reducir la radiación solar y el flujo de aire superficial, esta mayor humedad es particularmente útil en los meses más secos y en los climas semiáridos y áridos al reducir el estrés hídrico de los cultivos. Los cultivos de cobertura reducen la incidencia de plagas al romper la continuidad de los cultivos (Reeves, 1994), al alternar el cultivo comercial con el de cobertura las plagas no encuentran el huésped que necesitan. Esta serie de ventajas que pueden aportar las diferentes especies vegetales demuestra la importancia de los cultivos de cobertura como algo más que la simple cobertura. Los cultivos de cobertura más frecuentes son las leguminosas y los pastos, esto se debe a su alta cobertura del suelo, así como su rápido desarrollo, además de la capacidad de mantener o mejorar las propiedades del suelo.

Con el objetivo de proteger el suelo de la erosión hay prácticas que utilizan la misma idea que los cultivos de cobertura, pero en lugar de usar plantas se usan restos vegetales para cubrir el suelo y reducir la erosión. El acolchado o "*mulching*" en inglés consiste en aplicar restos vegetales como paja o similares que cubren el suelo reduciendo el impacto erosivo de la lluvia, al ser restos vegetales se descomponen progresivamente tras su aplicación aportando MO al suelo. También reduce la escorrentía al dificultar la circulación de la lámina de agua, y reduce la pérdida de humedad del suelo al hacer de barrera entre la radiación solar y el suelo. Es una técnica menos eficiente que los cultivos de cobertura, ya que la protección

del suelo puede ser menor, no contribuyen de forma tan notable a la mejora de las propiedades del suelo y puede ser removido del cultivo por fuertes vientos o una escorrentía elevada. Aun así, es una forma eficaz, sencilla y asequible de proteger el suelo, sobre todo en pequeños cultivos y en zonas donde el cultivo de cobertura no sea posible.

Cabe destacar el uso de mallas geotextiles para proteger el suelo (Rickson, 2006) y dificultar el desarrollo de especies vegetales no deseadas (Giménez-Morera et al, 2010). Los materiales geotextiles actúan de forma similar a los restos vegetales, cubren el suelo mitigando el impacto de la lluvia, actúan como barrera contra especies indeseadas, tienen propiedades aislantes que ayudan a que los cambios térmicos del suelo sean más suaves de lo que serían sin el geotextil, y además de retener la humedad del suelo. Las mallas geotextiles pueden colocarse en zonas de los cultivos como caminos y tramos sin vegetación, protegiéndose así las zonas desnudas del suelo donde no se puede establecer vegetación. Aun con estas ventajas los geotextiles aportan menor protección del suelo que los cultivos de cobertura, y no tienen el efecto mejorante en el suelo que, si tienen estos últimos, además, las propiedades de las distintas mallas dependen del material de fabricación por lo que no se puede establecer un criterio general para todos los geotextiles.

4.11. Laboreo de conservación.

La labranza de conservación tiene el objetivo de evitar los problemas asociados a la labranza tradicional. Con el fin de evitar la degradación del suelo en la labranza de conservación se lleva a cabo el laboreo de un menor espesor de suelo y sin volteo (Baker et al. 2008). Esto permite no dañar tanto la estructura mientras las propiedades de la capa superficial se mantienen casi intactas, consiguiendo que el suelo no pierda porosidad y no se compacte. Este tipo de agricultura exige dejar al menos un 30% de residuos del cultivo anterior en superficie (Unger, 1990), y fomentar las rotaciones de cultivos, consiguiendo así dañar lo mínimo posible la capa superficial del suelo y evitar la disminución del contenido de MO.

Los restos vegetales del cultivo actúan como los ya citados acolchados. La infiltración y la capacidad de retención de agua del suelo incrementan gracias a los manejos de labranza de conservación, permitiendo que haya más agua disponible para los cultivos y humedad en el suelo durante más tiempo. Esta mejora de la disponibilidad hídrica puede ser problemática en climas húmedos, ya que la humedad facilita la propagación de hongos y plagas. Por el contrario, en climas áridos la mayor disponibilidad de agua es un factor decisivo para garantizar el éxito

de las cosechas. Al labrar un menor espesor de suelo el esfuerzo de trabajo disminuye, reduciendo los gastos y el tiempo invertido por cultivo. Además, la erosión decrece drásticamente permitiendo que la explotación agrícola sea sostenible y se mantenga en el tiempo.

Los cultivos en franjas son otra forma de manejo agrario que reduce la erosión, se utiliza en zonas de moderada pendiente e implica una rotación de cultivos. La plantación se hace en varias hileras que siguen el contorno perpendicular a la pendiente, de forma que las distintas franjas se disponen a través de la ladera, actuando como múltiples barreras que frenan la erosión y retienen el material removido en las zonas superiores. Las franjas suelen ser de leguminosas o pastos, en rotaciones para proteger el suelo en las estaciones de más erosión, también es posible implementar franjas permanentes si la zona presenta valores de erosión muy altos a lo largo de todo el año.

El cultivo múltiple o policultivo es una práctica eficaz para reducir la erosión, consiste en el cultivo simultáneo de varias especies en un mismo terreno o en el cultivo continuado sin interrupción de varias especies. Al plantarse diversas especies de forma simultánea la cobertura del suelo es elevada, reduciéndose la incidencia de la erosión hídrica, y mejorándose la estructura del suelo, la infiltración y el contenido de MO. Es importante que los cultivos utilizados no compitan entre sí ni produzcan alelopatías que alteren el desarrollo de las otras especies. Este tipo de agricultura es común en pequeñas explotaciones como huertas usadas para autoconsumo, y es de difícil implementación a gran escala.

4.12. Prácticas de conservación del agua en el suelo.

El agua presente en el suelo se introduce en él mediante infiltración o por escorrentía subterránea, aunque la escorrentía subterránea no suele estar presente en los regadíos o realiza un aporte mínimo por lo que es más conveniente centrarse en la infiltración. La cantidad de agua infiltrada depende de la intensidad de la lluvia, de la permeabilidad del suelo, de la morfología del terreno, de la textura, de la vegetación presente y del contenido de humedad inicial del suelo. Conforme avanza el agua por el suelo va ocupando los espacios correspondientes a los macro, meso y microporos por este orden, quedando una parte del agua infiltrada disponible para las plantas.

Es importante destacar los manejos que utilizan barreras físicas o el entorno para ralentizar o detener la escorrentía. Estas prácticas usan barreras muertas o vivas, una barrera muerta está construida por materiales rocosos inertes mientras que una viva utiliza especies vegetales con una esperanza de vida de más de un año,

para reducir la velocidad del agua y evitar el arrastre de sedimentos. Cuando se reduce la velocidad de la escorrentía la infiltración aumenta, al mismo tiempo que se reduce la erosión provocada por el flujo de agua mitigando así la erosión del suelo. La construcción de terrazas también tiene el objetivo de aumentar el agua disponible para los cultivos. Las terrazas se construyen con una ligera inclinación contra la pendiente, de forma que el agua tiende a quedarse dentro de la terraza y se reduce la pérdida de sedimentos por arrastre. El objetivo principal es el de aumentar la humedad disponible al acumular el agua en las terrazas y favorecerse la infiltración.

4.13. Consecuencias del cambio climático en la agricultura.

El cambio climático (CC) supone una amenaza directa a la producción agraria mundial debido a los cambios en los regímenes de precipitación, el ascenso de las temperaturas, la mayor incidencia de plagas, los cambios en las precipitaciones, así como el ascenso del mar que provocaría intrusiones marinas en las regiones costeras, y una mayor incidencia de eventos climáticos extremos. Estos efectos ponen en riesgo la viabilidad de la agricultura actual, y ponen de manifiesto la necesidad de adoptar medidas que garanticen su sostenibilidad fomentando sistemas agrarios resistentes y resilientes.

El Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias en cooperación con la FAO utiliza los modelos NCAR, desarrollado por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica Estadounidense, y el CSIRO, desarrollado por la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth, para evaluar y predecir los efectos del cambio climático en la agricultura a nivel mundial. El primer modelo, contempla un aumento en las precipitaciones y del agua interna renovable en todo el mundo, debido al aumento del calor se produce mayor evaporación resultando en más precipitaciones, mientras que el segundo modelo prevé este aumento excepto en las zonas áridas y semiáridas donde ya hay estrés hídrico (regiones del Medio Oriente, Norte de África y África Subsahariana). Tanto si se producen mayores precipitaciones como si no, los aumentos de la temperatura a nivel global provocarían un aumento de las necesidades hídricas de los cultivos (Nelson et al., 2009), ya que las tasas de evaporación serán mayores. El incremento del estrés hídrico forzaría al uso de mayores volúmenes de agua en los cultivos de regadío, mientras que los cultivos de secano sufrirán un descenso del agua disponible, con impactos en el rendimiento y la viabilidad de estos cultivos en las regiones donde más se reduzcan las precipitaciones. Será necesario implementar manejos agrícolas que conserven la humedad y aumente el agua

disponible. Ambos modelos coinciden en una reducción del rendimiento de los cultivos de regadío, debido al estrés hídrico inducido por el ascenso de las temperaturas, lo que provocará que se necesite más agua de riego para menores producciones.

Estos cambios no afectarían por igual a todas las regiones de la Tierra. Los países en vías de desarrollo sufrirían reducciones del rendimiento para una amplia cantidad de cultivos, principalmente los de secano y el arroz. Las zonas de Asia Meridional sufrirían los descensos más graves en el rendimiento, con una reducción generaliza en todos los cultivos, mientras que otras zonas como el África subsahariana, América Latina y el Caribe tendrían efectos mixtos, con disminución de los rendimientos en cultivos de secano como el trigo y los cultivos de regadío como arroz o trigo entre otros, a la vez que otros cultivos aumentarían ligeramente la producción como sucedería con el maíz en algunas regiones (Nelson et al., 2009). Las regiones más frías verán aumentadas las posibilidades agrícolas y los rendimientos gracias al aumento de la temperatura, ya que una mayor variedad de cultivos podrá adaptarse a estas condiciones más cálidas. Los periodos de cultivo se prolongarán, facilitando la implementación de los cultivos en las latitudes medias y altas, donde se cosecha fuera de época actualmente por las condiciones climáticas.

Los modelos y las previsiones del cambio climático señalan que provocará un mayor número de eventos y fenómenos meteorológicos extremos, con mayor incidencia y severidad a lo largo del mundo (IPCC, 2007). Las sequías, las olas de calor y las inundaciones aumentaran, así como las tormentas e inundaciones, con efectos negativos como un mayor estrés hídrico, incendios, descensos en la producción agraria y problemas de salud humana. Por su naturaleza impredecible no hay medidas concretas y estables para evitar que se produzca el evento extremo, sino medidas para mitigar y adaptarse a la situación cuando se produzca. Los sistemas agrarios resilientes serán de suma importancia, ya que ante la inestabilidad y variabilidad que generará el cambio climático se necesitarán sistemas adaptativos con multitud de soluciones y respuestas a los problemas y que garanticen la producción y la sostenibilidad de los cultivos.

Se prevé que el cambio climático aumente la incidencia de plagas y enfermedades, ya que con el aumento de las temperaturas será más fácil que se establezcan en regiones donde el frío evita su desarrollo. El calor junto con las primaveras y veranos más largos permitirían que las plagas desarrollen mayor número de ciclos productivos, teniendo un impacto y prevalencia mayor en los cultivos. La

competencia entre las plantas oportunistas y los cultivos también puede verse agravada, ya que el incremento de las temperaturas y la fertilización por CO₂ podrían beneficiar a las malas hierbas haciendo más difícil su control, aunque esto dependería de cada especie y cada cultivo ya que los modelos contemplan que algunos cultivos tengan beneficios por estos cambios y se impongan sobre las plantas invasoras. Estas plagas y enfermedades son problemas que se deberán gestionar para reducir su impacto o evitar que se produzcan. Para ello, prácticas agrícolas como la rotación de cultivos, que rompen los ciclos de las plagas al rotar el cultivo huésped con otros que no hospedan a las enfermedades o plagas, serán beneficiosos. Las especies resistentes a las plagas y enfermedades, así como las plantas que presenten alelopatías específicas que eviten la propagación de las plagas son manejos útiles para aumentar la resistencia de los cultivos a estos problemas.

5. Conclusión

La revisión bibliográfica ha permitido constatar la variedad de impactos y procesos que los manejos agrícolas pueden provocar en el suelo, a partir de los cuales se ha concluido que:

- Los manejos agrícolas convencionales tienen una capacidad de protección y conservación del suelo muy reducida, facilitando en la mayoría de los casos que se produzca dicha degradación. No son sostenibles y a medio y largo plazo tienen efectos perjudiciales en el suelo.
- Las prácticas de conservación y protección del suelo han demostrado cumplir su función, evitando la degradación del suelo al mismo tiempo que mejoran sus propiedades y permiten que la producción agrícola se mantenga en el tiempo de forma sostenible.
- La bibliografía sobre el tema es extensa y diversa, se ha constatado que hay suficientes evidencias e investigaciones sobre el tema que avalan la necesidad de implementar sistemas de protección del suelo con el fin de evitar manejos dañinos para este recurso. A pesar de estas evidencias se ha observado que su implementación es reducida.

6. Bibliografía

Argentel, L., González, L., Ávila, C. & Aguilera, R., (2006). "Comportamiento del contenido relativo de agua y la concentración de pigmentos fotosintéticos de variedades de trigo cultivadas en condiciones de salinidad". *Cultivos Tropicales*, 27, pp. 49-53.

Ata-Ul-Karim, S. T., Cang, L., Wang, Y. & Zhou, D., (2020): "Interactions between nitrogen application and soil properties and their impacts on the transfer of cadmium from soil to wheat (*Triticum aestivum*L.) grain." *Geoderma*, 357.

Bakels, C., (2009): *The Western European Loess Belt: Agrarian History, 5300 BC - AD 1000*. Springer Netherlands, Nueva York.

Baker, C. J., Saxton, K. E., Ritchie, Chamen W.C., Reicosky, D. C., Ribeiro M.F.S., Justice S.E. y Hobbs P.R. (2008): *Siembra con labranza cero en la agricultura de conservación*. Zaragoza. Acribia.

Bogunovica, I., Pereira P., Kisica I., Sajkoa K., Sraka M. (2018). "Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia)". *Catena*, Volumen 160, pp. 376-384

Bronick C.J. y Lal R. (2005): "Soil structure and management: a review". *Geoderma*, 124, pp. 3-22.

Cáceres, D., (2002): "Agricultura orgánica versus agricultura industrial. Su relación con la diversificación productiva y la seguridad alimentaria." *Agroalimentaria*, (16), pp. 29-39.

Fageria, N. y Baligar, V., (2003): "Upland rice and allelopathy" *Advances in Agronomy*,(99).

FAO-OCDE, (2017): *Perspectivas Agrícolas 2017-2026*, Paris, OCDE.

FAO, (2017): *Trabajo estratégico de la FAO para reducir la pobreza rural*.

FAO, (2005): *Manejos de suelos y aguas*, Tegucigalpa, PASOLAC.

FAO, (2016): *Estadco mundial del recurso suelo*, Roma, FAO.

FAO, (nd). *Portal de suelos de la FAO*. Disponible en: [http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-](http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del)

suelo/es/

[Consulta: 23 de enero de 2020].

FAO, (nd): *Portal de Suelos de la FAO*. Available at: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-acidos/es/>

[Consulta: 04 03 2020].

Forján, H. & Manso, L., 2016. *y secuencias de cultivos en la Región Mixta Cerealera del centro-sur bonaerense: 30 años de experiencias*. Tres Arroyos, Buenos Aires, Ediciones INTA.

Francis, C., (1986): "Soil erosion on fallow fields: an example from Murcia". *Papeles de Geografía física*, pp. 21-28.

Gaba, S., Smith, B. y Lichtfouse E. (2018): *Sustainable Agriculture Reviews*. Springer.

Giménez-Morera A., Sinoga J. D., Cerda A. (2010.) "The impact of cotton geotextiles on soil and water losses from mediterranean rainfed agricultural land". *Land Degradation and Development*, Volumen 21, pp. 210-217.

Grahmann, K., Dellepiane, V. R., Terra, J. & Quincke, J., (2019): "Long-term observations in contrasting crop-pasture rotations over half a century: Statistical analysis of chemical soil properties and implications for soil sampling frequency". *Agriculture Ecosystems & Environment*, 287.

Jarecki M., Grant B., Smith W., Deen B., Drury C., Vanderzaag A., Qian B., Yang J., Wagner-Riddle C.(2018): "Long-term Trends in Corn Yields and Soil Carbon under Diversified Crop Rotations". *Journal of Environmental Quality*, 47, pp. 635-643.

Forcella F. y Lindstrom, F. (1988): "Weed Seed Populations in Ridge and Conventional Tillage". *Weed Science*, 36(4), pp. 500-503.

Läuchli, A., Grattan S. R. (2007). "Plant growth and development under salinity stress". en Jenks M. A. ed., *Advances in Molecular Breeding Toward Drought and Salt Tolerant Crops*. Dordrecht, Springer, pp1-32.

Mazuela, P. C., (2013). "Agricultura en zonas áridas y semiáridas". *IDESIA*, 31(2), pp. 3-4.

- Mendéz P. J., González R. C., Román G. A., Prieto G. F. (2009). "Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua". *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10 (1), pp. 29-44.
- Noble, A., Gillman, G. y Ruaysoongern, S.,(2000). "A cation exchange index for assessing degradation of acid soil by further acidification under permanent agriculture in the tropics". *European Journal of Soil Sciences*, 5, pp. 233-243.
- Oades, J. M., (1984). "Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management". *Plant and Soil*, 76, pp. 319-337.
- Olesen, J. E. y Bindi, M., (2002). "Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy". *European Journal of Agronomy*, 16, pp. 239-262.
- Ortega, G., (2009). "*Agroecología vs. Agricultura*". Base Investigaciones Sociales.
- Piedra, A. y González Cepero, M., (2013). "La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata". *Cultivos Tropicales*, 34(4), pp. 31-42.
- Qu, Z., Wang, J., Almoy, L., Bakken, L., 2014. "Excessive use of nitrogen in Chinese agriculture results in high $N_2O/(N_2O+N_2)$ product ratio of denitrification, primarily due to acidification of the soils". *Global Change Biology*, 20, pp. 1685-1698.
- Reeves, D., (1994). "Cover crops and rotations" pp. 125-158.
- Rickson, J. R. (2006). "Controlling sediment at source: an evaluation of erosion control geotextiles". *Earth Surface Processes and Landforms*, Volumen 31, pp. 550-560.
- Sainju, U., Whitehead, W., Singh, B., (2003). "Cover crops and nitrogen fertilization effects on soil aggregation and carbon and nitrogen pools". *Canadian Journal of Soil Science*, 83(2), pp. 155-165.
- Salinas-Garcia, J., Hons, F., Matocha, J. (1997). "Long-Term Effects of Tillage and Fertilization on Soil Organic Matter Dynamics". *Soil Science Society of American Journal*, 42, pp. 79-93.

Soane B.D. y van Ouwerkerk C. (1994). "Soil Compaction Problems in World Agriculture". En: *Developments in Agricultural Engineering*. s.l.:Elsevier, pp. 1-21.

Unger P.W. (1990) "Conservation Tillage Systems". In: Singh R.P., Parr J.F., Stewart B.A. (eds) *Advances in Soil Science*. Advances in Soil Science, vol 13. Springer, New York, NY.

Unger P.W. y Kaspar T.C. (1994). " Soil Compaction and Root Growth: A Review." *Agronomy Journal*, Volumen 86, pp. 759-766.

Villamil, M., Bollero G., Darmondy R., Simmons F., Bullock D. (2006). "No-Till Corn/Soybean Systems Including Winter Cover Crops: Effects on Soil Properties". *Soil Science Society of America*, 70, pp. 1936-1944.

Xu, D., Carswell A., Zhu Q., Zhang F., de Vries W. (2019). "Modelling long-term impacts of fertilization and liming on soilacidification at Rothamsted experimental station". *Science of the total Environment*, 713.