



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS
AGRARIAS DE PALENCIA**

MÁSTER EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

**ESTUDIO DEL REGIMEN HÍDRICO DEL SUELO BAJO
DISTINTOS SISTEMAS DE LABOREO EN MAÍZ. FINCA
ZAMADUEÑAS, VALLADOLID**

Alumno: Laura Rodríguez Bragado

Directora: Dra. Dña. Aurora Sombrero Sacristán

Tutor: Dra. Dña. Mercedes Sánchez Bascones

Junio de 2015

Agradecimientos

Llegado este momento, en el que finalizo una pequeña etapa dentro de mi formación, deseo expresar mi gratitud y respeto a las personas que me han acompañado durante este tiempo.

Muchas gracias a la Dra. Aurora Sombrero Sacristán, directora de este trabajo, por todo el tiempo que dedica a mi formación y sus sabios consejos.

Muchas gracias a la Dra. Mercedes Sánchez Bascones, directora de este trabajo, porque siempre está disponible para ayudarme, enseñarme y aconsejarme.

Muchas Gracias al Dr. Mike Beare, el profesor que dirigió mi trabajo en Nueva Zelanda, por hacerme sentir como en casa, a pesar de estar en la otra parte del mundo.

Gracias a los técnicos Pierre Casta y Carmen Díez Fraile, por participar en este proyecto y ayudarme tanto cuando comencé mi camino en la investigación. Les deseo mucha suerte.

Gracias a mis compañeros de la unidad de Cultivos Herbáceos del ITACyL, especialmente a Elena Garcia, que comenzó siendo compañera y ahora es mi amiga, al personal de finca, todos han estado presentes de una u otra forma. Me animan a seguir esforzándome cada día y en gran parte es gracias a ellos por lo que llevo cuatro años entrando cada mañana con una sonrisa a mi trabajo.

Por último, gracias de corazón a las personas que han estado tan cerca, apoyándome y creyendo en mí, ellos me hacen sentir cada día todo lo que necesito para ser feliz.

Mis padres y mis hermanos, porque aún viviendo mil vidas no podría darles todo lo que ellos me dan a mí. Son lo mejor y más bonito que tengo en la vida.

Mil gracias a Juan y Mawi, esas personas que se convierten en la familia que eliges, que te enseñan que la vida es mucho más de lo que imaginas y hacen que cada día tenga motivos para reír.

A Marta, mi amiga, mi compañera, doy gracias a la vida por ponerla en mi camino y poder aprender de ella cada día. Todo lo que te pueda escribir no es ni una milésima de lo que mereces. A ti va dedicado este trabajo.

Gracias al Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), por la financiación del proyecto por el cual se ha desarrollado este trabajo. Mi agradecimiento al Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL) lugar donde hemos desarrollado esta investigación y se nos han facilitado todos los medios materiales y humanos necesarios para llegar hasta aquí.

ESTUDIO DEL REGIMEN HÍDRICO DEL SUELO BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE LABOREO EN MAÍZ. FINCA ZAMADUEÑAS, VALLADOLID

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	7
1.1. Objetivos	9
1.1.1. Objetivo general	9
1.1.2. Objetivos específicos	10
2. SITUACIÓN ACTUAL	12
3. MATERIAL Y MÉTODOS	20
3.1. Zona de estudio	20
3.2. Diseño experimental	23
3.3. Labores culturales	24
3.3.1. Laboreo, desarrollo y manejo del cultivo	24
3.3.2. Densidad aparente	29
3.4. Métodos de medición del agua en el suelo utilizados en el estudio	31
3.4.1. Indirectos	31
3.4.2. Directo o gravimétrico	37
3.4.3. Determinación de las curvas características de humedad del suelo	37
3.4.4. Manejo del riego y determinación de las necesidades de agua en maíz	40
3.5. Análisis estadístico	42
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1. Densidad aparente	45
4.2. Curvas características de humedad	47
4.1. Calibración de la sonda FDR	48
4.2. Influencia del laboreo en la dinámica del agua en el suelo	49
4.3. Influencia del sistema de laboreo en la producción de biomasa y rendimiento del cultivo	59
5. CONCLUSIONES	61
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aportes y aprovechamiento y pérdidas de agua en un suelo agrícola en regadío. _____	16
Figura 2. Zona de estudio y localización del ensayo en la finca Zamadueñas, Valladolid. _____	20
Figura 3. Evolución de la temperatura media, mínima y máxima durante las campañas de regadío 2012 y 2013 en el experimento. Datos recogidos por la estación meteorológica VA101. _____	23
Figura 4. Fotografía aérea del ensayo (escala 1:4000) donde se delimita cada parcela y se indica el número de la misma. El conjunto de parcelas dentro de los recuadros rojos determinan el cultivo de maíz de este estudio, de ellas, las contenidas en el recuadro superior pertenecen al laboreo convencional y las del recuadro inferior al no laboreo. _____	24
Figura 5. Siembra de maíz en laboreo convencional y no laboreo respectivamente (05-05-13). Finca Zamadueñas 2013. _____	25
Figura 6. Fotografía tomada del maíz en laboreo convencional (19-08-13). _____	26
Figura 7. Plantas de maíz en no laboreo (08-07-13). _____	27
Figura 8. Cosecha mecánica del cultivo de maíz y equipo de toma de humedad, peso específico y peso del grano en campo. _____	29
Figura 9. Proceso de la recogida de muestras para determinar la densidad aparente del suelo. _____	30
Figura 10. Recogida de muestras de suelo inalteradas para determinar la densidad aparente (07-03-12). _____	30
Figura 11. Esquema de un sistema Frequency Domain Reflectometry. _____	33
Figura 12. Equipo de instalación de los tubos de acceso, tensiómetros y equipos complementarios del régimen hídrico en el suelo. _____	34
Figura 13. Tubos de acceso para la sonda FDR en no laboreo. _____	35
Figura 14. Esquema del equipo de medición FDR, sonda y monitor de control y visualización. _____	35
Figura 15. Esquema de los pasos seguidos para determinar la ecuación de calibración de la sonda FDR. _____	37
Figura 16. Membrana de Richards junto con el material necesario para el uso del equipo de pF para muestras de suelo. _____	38
Figura 17. Placa cerámica para el equipo de pF con cilindros de volumen conocido enumerados para su correcta identificación, y que posteriormente se llenarán de muestra suelo. _____	38
Figura 18. Esquema general del equipo de pF: 1. Vacuómetro, 2 y 3. Llave de presión, 4 y 5. Manómetros, 6. Generador, 7 y 8. Ollas de succión. _____	39
Figura 19. Relación entre la humedad volumétrica del suelo y su equivalencia en pF y en atmósferas. _____	40
Figura 20. Evolución de Kc determinada por la FAO, por la estación meteorológica de trabajo y la adaptada al experimento en función de las etapas de crecimiento del cultivo. _____	41
Figura 21. Evolución del balance hídrico durante las campañas de cultivo 2012 y 2013. _____	42
Figura 22. Evolución de los valores de densidad aparente media, mínima y máxima por profundidad y sistema de laboreo. _____	46
Figura 23. Curvas características de retención de humedad en capacidad de campo y punto de marchitez a lo largo del perfil del suelo, pF4.2 = Punto de marchitez y pF2.7 = Capacidad de Campo. _____	47
Figura 24. Calibración propia de la sonda FDR Diviner 2000 para muestras de suelo recogidas en el ensayo de Zamadueñas. _____	49
Figura 25. Evolución de la media de la temperatura de la superficie del suelo (10cm) a lo largo de la campaña de riego en maíz. _____	51
Figura 26. Aportes y contenido de agua en los horizontes del suelo 10-20cm, 20-30cm, 30-40cm y 70-80cm de profundidad a lo largo de las campañas 2012 y 2013 en ambos sistemas de laboreo. _____	55
Figura 27. Dinámica temporal del agua aportada al suelo un día después del evento de riego en laboreo convencional, en la campaña 2012. _____	56
Figura 28. Dinámica temporal del agua aportada al suelo un día después del evento de riego en no laboreo, en la campaña 2012. _____	56
Figura 29. Dinámica temporal del agua aportada al suelo un día después del evento de riego en laboreo convencional, en la campaña 2013. _____	57

Figura 30. Dinámica temporal del agua aportada al suelo un día después del evento de riego en no laboreo, en la campaña 2013.	57
Figura 31. Comportamiento de cada horizonte del suelo frente a los aportes de agua de riego en laboreo convencional, durante las campañas 2012 y 2013. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 32. Comportamiento de cada horizonte del suelo frente a los aportes de agua de riego en no laboreo, durante las campañas 2012 y 2013.	59
Figura 33. Rendimiento del cultivo de maíz en la cosecha mecánica en laboreo convencional y no laboreo en las campañas 2012 y 2013.	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Datos climáticos del periodo 1981-2010 en la ciudad de Valladolid. Fuente: Agencia Estatal de Meteorología.	21
Tabla II. Condiciones climáticas durante los años de estudio 2012 y 2013.	21
Tabla III. Labores preparatorias y culturales del cultivo de maíz realizadas en el ensayo de la Finca de Zamadueñas en las dos campañas estudiadas, 2012 y 2013.	28
Tabla IV. Valores correspondientes a los componentes del balance hídrico, durante las cuatro semanas de cada mes de las campañas de riego 2012 y 2013.	42
Tabla V. Valores de la densidad aparente media, mínima y máxima, junto con el error estándar de la media, en cada una de las profundidades de medición y año de toma de muestras en función del sistema de laboreo.	46
Tabla VI. Ecuaciones de calibración de la sonda de capacitancia Diviner 2000, R^2 = coeficiente de determinación, σ = desviación típica, SF = Frecuencias normalizadas y θ_v = humedad volumétrica ($m^3 m^{-3}$).	48
Tabla VII. Ecuaciones de calibrado y densidades medias del suelo obtenidos por Groves y Rose (2004).	49
Tabla VIII. Biomasa vegetal, humedad de la biomasa e índice de cosecha determinado en laboreo convencional y no laboreo en las campañas 2012 y 2013.	60

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El agua es el elemento fundamental para el desarrollo de la vida. En la evolución humana el agua ha tenido un papel de gran importancia, como elemento vital y como factor determinante en el desarrollo agrario y de la sociedad en su conjunto. El efecto de gases de efecto invernadero ha incrementado la inestabilidad climática con un creciente déficit hídrico. Teniendo en cuenta que el agua destinada al regadío supera el 70% de la total consumida a nivel mundial, se considera necesario aumentar la optimización del uso del agua en sistemas agrícolas de regadío (Lecina et al., 2003).

El agua y el suelo son factores íntimamente relacionados y de esta forma el agua del suelo forma parte del ciclo hidrológico. En este contexto, el suelo es un reservorio importante de agua, que transforma una precipitación, discontinua en el tiempo y espacio en descargas continuas conocidas, abasteciendo continuamente con humedad las raíces de las plantas. La conservación del suelo favorece el mantenimiento de la estructura del mismo, la evolución de la actividad microbiana y enzimática, y por tanto la formación de un sistema vivo capaz de mantener de forma eficiente la humedad en el perfil del suelo. Es por ello que la calidad del suelo y la optimización del uso del agua en regadío son dos conceptos que van unidos, y son inconcebibles el uno sin el otro. Los sistemas producción agrícola convencionales pueden reducir la calidad del suelo, alterando sus propiedades físicas, químicas y biológicas y reduciendo la capacidad de retención de agua en el perfil del terreno, lo que favorece el estrés hídrico del cultivo (Spedding et al., 2004).

Una de las estrategias para lograr la optimización del uso del agua de riego es el establecimiento de nuevas técnicas agronómicas, como es el laboreo de conservación.

La Agricultura de Conservación es la alternativa al laboreo convencional y se define, según la Asociación Española de Agricultura de Conservación y Suelos Vivos (AEAC.SV), como aquellas prácticas agronómicas que permiten el manejo del suelo agrícola alterando lo menos posible su composición, estructura y biodiversidad, evitando también su erosión y degradación. También se define como aquella que mantiene un mínimo del 30% de superficie cubierta por los restos de cosecha del cultivo precedente. El no laboreo es un sistema de laboreo de conservación donde el suelo no se ve alterado por ningún tipo de labor preparatoria del lecho de siembra.

La agricultura de conservación, concretamente el laboreo mínimo y el no laboreo fueron desarrollados en EEUU para dar solución a los problemas de degradación de suelo ocasionados por una sobreexplotación del mismo en la agricultura. En Europa, la Agricultura de Conservación, además de favorecer la conservación del suelo y el agua, reduce los costes de producción de los cultivos y hay un ahorro de tiempo en la realización de las labores (Cannell y Hawes, 1994; Pittock y Holland, 2004; Muñoz et al., 2007). La introducción de la agricultura de conservación en Europa también fue

favorecida por la Política Agraria Comunitaria, cuyo fin fue conseguir una agricultura sostenible (AEAC.SV, 2000).

La Agricultura de Conservación favorece la conservación del suelo, la optimización del uso de los recursos naturales y la protección del medio ambiente y está reconocida como un medio beneficioso y considerado como un sistema de producción prometedor de futuro (Sombrero y de Benito, 2010; Montero et al., 2013; Gathala et al., 2015).

En la actualidad, los sistemas de laboreo de conservación, tienen como una entre otras prioridades la conservación del suelo, y la mejora de la calidad del mismo. El laboreo de conservación facilita la infiltración del agua de lluvia y disminuye la evaporación directa por la protección de los restos de cosecha sobre la superficie del suelo y como consecuencia aumenta la reserva de agua del suelo y mejora la eficiencia en su uso (Mupanga et al., 2011).

Los datos sobre superficie regada en España constatan un incremento moderado pero constante, desde hace más de una década, al pasar de 3.367.486 hectáreas en 2002 a 3.605.121 hectáreas en 2014. La producción de los sistemas agrícolas de regadío supone el 60% de la producción final agraria en España (Garrido et al., 2008). El volumen de agua de riego utilizado en el sector agrario muestra una tendencia decreciente, al descender de 17.681 hectómetros cúbicos en 1999 a 15.833 en 2012 (MAGRAMA, 2014). De estos datos se destila una mayor eficiencia en la utilización de los recursos hídricos en la agricultura actual, resultado de las actuaciones acometidas para la modernización de los regadíos en España, la eficiencia en el uso del agua, debida a la mejora en su gestión y por la evolución progresiva hacia sistemas de riego más eficaces (López Fuster y Montoro, 2005).

Existen diversos inconvenientes que justifican por qué el riego tal y como se viene practicando no puede seguir creciendo como en las últimas décadas. Las explotaciones agrícolas de regadío suponen la intensificación del uso del suelo y su deterioro, la utilización intensiva de fertilizantes y el agotamiento y/o degradación de los recursos hídricos. Además, este sistema supone mayores costes de producción que los cultivos de secano y una gran cantidad de tiempo dedicado al trabajo de campo. Uno de los mayores problemas de la agricultura de regadío es el coste energético, agravado en España por el incremento de las tarifas eléctricas en la última década. Entre 2008 y 2010 estas tarifas energéticas aumentaron un 120% y en agosto de 2013 aumentaron considerablemente los costes fijos (término de potencia) en la factura eléctrica (Rodríguez et al., 2011).

Por supuesto, no solamente seguirá practicándose el riego, sino que las superficies regadas aumentarán a pesar de estos inconvenientes; la problemática actual obligará a buscar formas de incrementar la eficiencia en el uso del agua, para así impactar en aquellos aspectos donde el efecto de protección de este recurso, tanto en calidad como

en cantidad, sea el mayor posible (FAO, 2013). Por todo lo anterior, será imprescindible reorientar los sistemas de producción en regadío para conseguir un equilibrio entre la productividad y los costes de producción, tanto económicos como ambientales, que suponen este tipo de explotaciones agrícolas.

Por lo descrito anteriormente, el agua es el principal factor limitante de la producción, este hecho se intensifica en zonas áridas y semiáridas de España. Es por ello, que el seguimiento y cuantificación del agua del suelo, adquieren un papel fundamental en el sector de la investigación agrícola. Por este motivo, uno de los objetivos de las explotaciones agrícolas de regadío pasa por medir y monitorizar el contenido de agua a lo largo del perfil del suelo, con el uso de métodos directos (método termo-gravimétrico) e indirectos, como sensores que determinan el contenido de agua del suelo.

Por todo esto, el objetivo general de este trabajo ha sido estudiar la dinámica del agua en el suelo y su comportamiento a lo largo de la campaña de riego bajo dos sistemas de laboreo, laboreo convencional (LC) y no laboreo (NL), en el cultivo de maíz. El estudio se realizó durante 2012 y 2013 mediante el uso de una sonda de capacitancia FDR. El balance del agua fue determinado mediante los datos climáticos obtenidos por la estación meteorológica más cercana y las mediciones semanales de la humedad volumétrica del perfil del suelo dadas por la sonda FDR. Las curvas características de humedad señalaron el porcentaje de humedad del suelo y si éste se comprendía entre la capacidad de campo y el punto de marchitez, y por tanto, si se trataba de agua útil para el maíz. Se determinaron la biomasa y producción del cultivo de cada parcela experimental en cosecha

En este estudio los resultados indicaron que el sistema de laboreo afectó de forma significativa al comportamiento de la humedad en el perfil del suelo. El manejo de suelo de NL almacenó una mayor cantidad de agua en los distintos horizontes del suelo en el cultivo de maíz, en comparación con el de LC y la mantuvo durante más tiempo. De este hecho se podría deducir que para este cultivo las necesidades de agua riego serían menores en este sistema y se evitarían pérdidas de agua y de nutrientes por lixiviación. Por último, el sistema conservacionista de no laboreo en el cultivo de maíz en regadío podría ser productivamente viable por los resultados obtenidos, aunque estudios futuros serán necesarios para llegar a obtener conclusiones más sólidas.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

De este modo se pretendió determinar la influencia del sistema de laboreo de conservación, no laboreo, comparado con un sistema convencional sobre la retención

de agua procedente del riego y su disponibilidad para el cultivo de maíz, así como la producción del mismo.

1.1.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos se pretendió:

- Monitorizar el contenido de agua en el perfil del suelo durante dos ciclos de un cultivo de maíz en regadío utilizando sondas de capacidad FDR.
- Estudiar los efectos del sistema de laboreo en la dinámica del agua en el suelo, por un lado la retención de agua mediante la capacidad de campo y el punto de marchitamiento y por otro, el movimiento vertical del agua después de los riegos y su posible percolación hacia aguas subterráneas.
- Estimar el consumo de agua del cultivo de maíz en ambos sistemas de laboreo para lograr un equilibrio entre los aportes de agua y las necesidades del suelo.
- Determinar los efectos del sistema de laboreo en la producción biomasa vegetal y de grano en el cultivo de maíz.

SITUACIÓN ACTUAL

2. SITUACIÓN ACTUAL

La situación actual del agua en el mundo corresponde a un panorama de escasez, sobreexplotación y contaminación, tratándose de un factor limitante para el desarrollo sostenible principalmente en zonas áridas y semiáridas. En la mayoría de los países, el principal consumo de agua se debe al riego de los cultivos (Calera Belmonte et al., 2005). Durante las últimas décadas, la agricultura en regadío ha sido una importante fuente de producción de alimentos. Los rendimientos de los cultivos regados son más del doble de los que pueden obtenerse en secano, incluso los sistemas agrícolas de regadío con bajos insumos son más productivos que la agricultura de secano con altos insumos.

A nivel mundial, especialmente en zonas áridas y semiáridas, el regadío cobra especial importancia y la adecuada gestión de los recursos hídricos es un tema tan importante como conflictivo. La mayor parte de los expertos en gestión de recursos hídricos admite que los conflictos que se generan en torno al regadío, se deben conjuntamente a la escasez física de agua y a su inadecuada gestión.

Son numerosas las investigaciones realizadas con el objeto de aportar información e intentar mejorar el uso de los recursos hídricos en el mundo, cuantitativa y cualitativamente. Buerkert (2005) realizó un mapa mundial de superficies regadas que aportó luz acerca de la distribución y gestión del agua utilizada por el riego en la superficie terrestre y la superficie cultivada en regadío suponía el 18% de la superficie total cultivada. Los resultados obtenidos por De Rosnay (2006) reportó información acerca del impacto de la variabilidad del clima en las necesidades de agua de riego a nivel mundial, la importancia del riego en la agronomía y el balance global del agua en el tiempo y en el espacio y su traducción en rendimientos de los cultivos. En EEUU, los resultados aportados por Bruinsma (2003) y Picking (2004), mostraron que rendimientos medios de los cultivos de regadío superaron a los rendimientos obtenidos en secano en un 15% en el caso de la soja, un 30% en maíz y más de un 100% en cereales de invierno. En la mayor parte de España es inconcebible el cultivo de cereales de primavera sin riego y los rendimientos en regadío se pueden equiparar con los obtenidos en gran parte de EEUU en secano.

El maíz es el cultivo que supone un mayor consumo de agua en España, utilizando el 16% del total de agua consumida (López Fuster et al., 2005), además este cultivo, tal y como se viene practicando en nuestro país, supone un laboreo intensivo del suelo en la preparación para la siembra. Esto implica una destrucción total de la estructura del suelo, una exposición de las partículas a la erosión hídrica y eólica, y un aumento de la mineralización y destrucción de la materia orgánica (Steduto et al., 2009). También, con los arados de vertedera se produce una suela de labor impermeable por debajo de la capa arable, que impide el paso del agua hacia horizontes más profundos y la

proliferación de las raíces de maíz a mayores profundidades. Todas estas labores del suelo suponen también gastos añadidos de producción, como los adicionales de maquinaria, arados especiales y tractores más potentes, los de energía empleada en estas labores y los de la mano de obra necesaria para la realización de estos trabajos (García-Orenes et al., 2009; Sombrero et al., 2008; Bertol et al., 2014; Busari y Salako 2015).

En la actualidad, los sistemas de laboreo de conservación, tienen como una de las prioridades la conservación y mejora de la calidad del suelo, evitando las pérdidas de suelo, arrastrado por el agua de escorrentía (Unger, 1994; Mickelson et al., 2001) y el aumento de la erosión que produce el laboreo convencional (Reicosky et al., 1995; Munodawafa y Zhou 2008; Zhang et al., 2011), y mejorando la calidad del suelo con la restauración de su estructura y de la actividad microbiana y enzimática debido a los restos de cosecha de los cultivos sobre la superficie del suelo como se realiza con el sistema de no laboreo. Estas propiedades además se mejoran estableciendo rotaciones de cultivo adecuadas (López-Fando 2007; Franchini et al., 2007).

El estudio de la influencia de los sistemas de laboreo sobre el contenido de humedad del suelo ha sido objeto de numerosos trabajos de investigación a nivel mundial. Esto es debido a la importancia del recurso del agua como uno de los principales factores limitantes de la producción. Los sistemas de laboreo de conservación facilitan la retención del agua de riego y disminuyen la evaporación directa por la protección de los restos de cosecha sobre la superficie del suelo (Unger y Fulton, 1990; Potter et al., 1995; Norwood et al., 1999), como consecuencia, aumenta la reserva temporal de agua del suelo (Unger, 1995; Franzluebbers et al., 1995b) y se optimiza su uso (Moreno et al. 2013).

Los estudios realizados en nuestro país acerca del laboreo de conservación en regadío son escasos por el momento. Las explotaciones agrícolas de regadío suponen grandes inversiones. A los agricultores les resulta complicado reconvertir su sistema de producción hacia el laboreo de conservación sin conclusiones sólidas que puedan dirigir y orientarles durante el cambio. De ahí la necesidad de estudiar la comparación los efectos de los sistema de laboreo, convencional y no laboreo, en el desarrollo y producción de los cultivos de regadío, y en la optimización del uso del agua de riego.

Según la AEAC.SV, España es uno de los países en los que la Agricultura de Conservación puede reportar mayores beneficios, pero no siempre se puede adaptar a todos los tipos de suelo y condiciones productivas. Es importante conocer cada explotación agrícola y la problemática de cada zona antes de introducir cambios en la dinámica de producción.

El laboreo de conservación en maíz ha sido y está siendo objeto de numerosos trabajos, Sampathkumar (2013), en un estudio realizado en India, señaló las pérdidas

de producción ocasionadas por el déficit de riego. Otros autores, como Al-Kaisi y Licht (2004) en EEUU, obtuvieron menores rendimientos de maíz en NL, aunque la productividad final fue superior a la del LC, debido a la disminución de costes de producción. Muchos autores también han centrado sus trabajos en la degradación de la calidad del suelo que supone el laboreo intensivo en el cultivo de maíz regado. Silva (2010) estudió durante 26 años la evolución de las propiedades biológicas del suelo dedicado al monocultivo de maíz, y concluyó que el no laboreo incrementó en un 100% el carbono y nitrógeno procedente de la biomasa microbiana. Los resultados obtenidos por Wang (2014) en un estudio del cultivo de maíz realizado en China durante 3 años, señalaron los efectos negativos del laboreo intensivo del suelo en la fertilidad del mismo.

Existen numerosas investigaciones en España que han determinado el comportamiento agronómico del maíz en la península, su capacidad productiva y sus exigencias hídricas y en nutrientes (Román et al., 1996; Moreno et al., 1996; López-Cedrón et al., 2006; Bastida et al., 2007). Salem (2015) estudió en España, los efectos del sistema de laboreo en el rendimiento y régimen hídrico del cultivo de maíz. Salem obtuvo un rendimiento de maíz un 15.4% inferior en NL en comparación con el LC. Además, en relación al régimen hídrico, el sistema de NL retuvo temporalmente mayor cantidad de agua de riego en el perfil del suelo. Estos resultados coincidieron con los obtenidos por Muñoz (2005), en estudios realizados en el sur de España, el cual mostró que en el sistema de LC hubo una disminución del contenido de humedad en el suelo del 33% en relación al de NL. En este estudio, además, el sistema de NL tuvo un 68% más de materia orgánica que el de LC, lo que se tradujo en una disminución de la fertilidad del suelo en los sistemas de laboreo tradicionales.

La humedad del suelo determina la actividad biológica, los procesos físicos y químicos y la hidrología de los suelos. Los procesos de erosión, sus tasas, y las formas terrestres dependen indirectamente del régimen hídrico del suelo. Estudiar el comportamiento del agua en el suelo es básico para entender los procesos geomorfológicos y optimizar su uso en regadío. A pesar de esto, son poco conocidas las variaciones espaciales y temporales de la humedad del suelo y la influencia de los cultivos sobre ésta. El desconocimiento del régimen hídrico de los suelos es aún más patente en sistemas de no laboreo en regadío.

El régimen hídrico del suelo es una característica generalizada del conjunto de fenómenos de ingreso de humedad en el suelo, de su movimiento, del cambio en su estado físico y su gasto. En el estudio del balance hídrico, se hace necesario llevar a cabo un monitoreo hídrico en el suelo que consiste en la determinación de un cambio en el contenido de agua del perfil del suelo, producto de las entradas, salidas y almacenamiento que se producen en un volumen específico de suelo durante un lapso determinado de tiempo (Franzluebbbers et al., 1995; Boix-Fayos et al., 1999; Sime et al., 2015). El monitoreo hídrico se realiza mediante el uso de sensores capaces de

determinar el contenido de agua en el suelo de forma precisa y actualmente de forma continua en el tiempo.

La búsqueda de nuevos sensores ha sido ininterrumpida desde la aparición de los primeros tensiómetros. En la década de los setenta, se propuso el uso de la sonda de neutrones y en los últimos años, se han desarrollado sistemas basados en las relaciones entre la constante dieléctrica del suelo y el contenido de agua del mismo, el primero fue el sistema TDR (Time Domain Reflectometry) y posteriormente, se ha desarrollado un sistema basado en la Reflectometría de Dominios de Frecuencia, Frequency Domain Reflectometry (FDR).

La cantidad de agua que ingresa a un sistema agrícola de regadío, está representada por la precipitación, el riego, o ambas, además del ascenso capilar, generalmente expresados en altura de agua o unidades de caudal (Figura 1). Eagleson (1982) sostuvo que factores meteorológicos, vegetación y suelos evolucionan conjuntamente de manera que, en zonas mediterráneas, la vegetación se adaptó para utilizar al máximo el agua almacenada en los suelos. La cubierta vegetal; situada entre la fase aérea (atmosférica) y terrestre del ciclo del agua, fue uno de los principales partícipes (junto con la precipitación y la topografía entre otros) en la recarga hídrica de los suelos y de formación de escorrentía (Cerdeira, 1995; Boix Fayos, 1999), ya que intervino directamente sobre la tasa de precipitación neta registrada en la superficie del suelo, sobre las tasas de infiltración de éste, sobre la redistribución del agua en el mismo y sobre las pérdidas por evapotranspiración.

Por otro lado, el suelo podría perder el agua por percolación profunda, evapotranspiración, procesos de escorrentía superficial, y por flujos subsuperficiales, aunque estos dos últimos parámetros podrían ser considerados también como una ganancia si los aportes fueran mayores que las salidas.

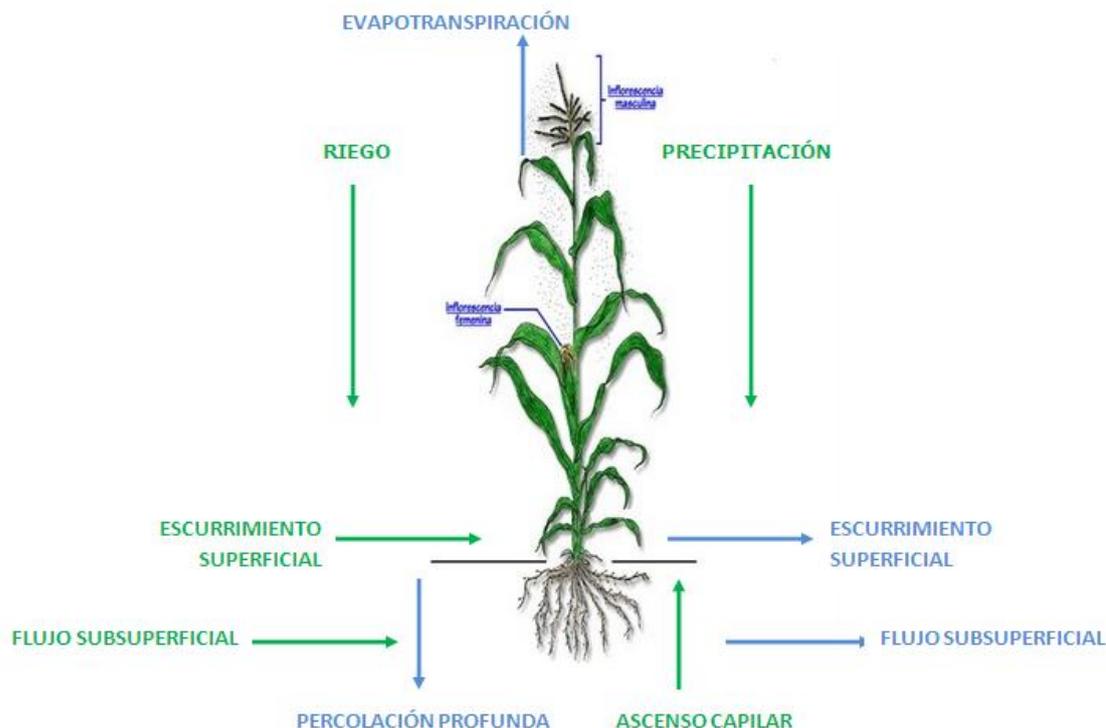


Figura 1. Aportes y aprovechamiento y pérdidas de agua en un suelo agrícola en regadío.

El monitoreo del agua en el suelo podría establecer un buen manejo del riego, optimizando la distribución espacial y temporal del agua, con el objetivo de ahorrar costes y aumentar la producción y calidad de los cultivos. Además, monitorizar de forma adecuada el agua en el suelo permitió mantener un adecuado nivel de humedad en el mismo, evitando pérdidas de agua por drenaje y la posible lixiviación de fertilizantes (Dagdelen et al., 2008; Álvarez y Steinbach 2009).

La programación eficiente del riego, a través de sondas de captancia (FDR) y el estudio de la dinámica del agua en el perfil del suelo, son herramientas indispensables en la gestión y desarrollo sostenible de los sistemas agrícolas, permitiendo el equilibrio entre la producción y la conservación de los recursos hídricos.

El maíz, al adaptarse a condiciones climáticas diversas se cultiva en todos los continentes, en todas las regiones cálidas de la zona templada y la zona húmeda subtropical. Según datos del departamento de agricultura de EEUU (USDA). Se prevé que en 2015 la producción mundial de maíz será superior a los 990 millones de toneladas, situándolo como el primer cereal mundial, seguido del trigo y del arroz. Los países con mayores producciones de maíz son, en primer lugar, EEUU con 361 millones de toneladas, China, en segundo lugar, con 215 millones de toneladas y Brasil con 75 millones de toneladas, producción equivalente a la total de la Unión Europea.

En España, según datos del último anuario del Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente (MAGRAMA, 2014), la superficie de maíz cosechada superó las 366000ha. La producción total fue de 3624900 toneladas y el rendimiento medio por hectárea de superficie superó los 10300kg ha^{-1} . Las hectáreas de maíz grano en no laboreo son muy escasas y no existen bases de datos oficiales de la superficie ocupada por este cultivo de regadío.

Por comunidades autónomas, la mayor productora fue Castilla y León con 103206ha y un rendimiento total superior al millón de toneladas, casi un tercio de la producción nacional, el rendimiento medio del maíz en regadío fue de 9970kg ha^{-1} . Las provincias con mayor superficie de maíz fueron León, en primer lugar, con 57152ha, Zamora con 18500ha y Salamanca y Valladolid con 13244 y 10345ha, respectivamente.

El maíz, debido a su gran diversidad, es cultivado en gran cantidad de climas. El área principal del cultivo está entre las latitudes 30 y 55°, con una superficie limitada en las latitudes superiores a 47°. El maíz requiere una larga estación de crecimiento y clima cálido, siendo imposible su cultivo en aquellas zonas donde la temperatura de verano sea inferior a 19°C, o el promedio de las temperaturas nocturnas durante los meses de verano sea menor de 13°C. La mayor producción se da en las zonas en que la temperatura de verano varía entre 21 y 27°C y el periodo libre de heladas se comprenda entre los 120 y 180 días.

En relación a sus necesidades hídricas, el maíz es cultivado en áreas donde la precipitación anual varía de 250 a más de 5000 mm. La cantidad de agua que necesita varía entre 410 y 640 mm, unos 5mm diarios. El tipo de riego más común es por aspersión. En el cultivo de maíz, se considera que la floración y las etapas iniciales del período de llenado de grano son críticas para la determinación del rendimiento del cultivo. Debido a esto, la presencia de temperaturas altas, asociadas con sequías durante estas etapas, pueden afectar los procesos de polinización, fecundación y desarrollo del grano. Consecuencia de esto, se produce una desecación de estigmas y de los granos de polen y se puede reducir la duración del período de llenado de grano. Todo ello afecta a la producción final obtenida y por tanto a la rentabilidad de la explotación (Wilhelm et al., 1999; Nakamoto et al., 2001).

Numerosas investigaciones han tratado de optimizar el uso del agua de riego en maíz, evitando el estrés hídrico en las etapas de máximas necesidades, resultados reportados por Irmak (2000) en Turkia, muestran la relación entre la producción de grano de maíz y la cantidad de agua aportada mediante el riego. Los rendimientos máximos obtenidos fueron 6600kg ha^{-1} con un consumo de agua de 440mm y un mantenimiento de la humedad del suelo entre riegos del 50% del agua útil. Calviño (2003) obtuvo un modelo que representaba el rendimiento del maíz en función de su consumo de agua en cada una de las etapas del cultivo, los resultados mostraron un rendimiento que

variaba entre 4200 y 10000kg ha^{-1} en función del estrés hídrico producido en la etapa de floración.

En definitiva, se podría decir que la temperatura determina el área de cultivo del maíz y el agua define su potencial de producción. El maíz es uno de los cultivos más ampliamente estudiado a nivel mundial, muchos autores se han dedicado al estudio para la mejora del rendimiento del cultivo, optimizar dosis de fertilización y preservar en cantidad y calidad los recursos hídricos destinados al riego de maíz. Investigaciones en Argentina (Martellotto et al., 1999; Puiatti et al., 2002; Rivetti et al., 2006) se han centrado en estudiar la productividad del maíz en situaciones de déficit hídrico, todos los autores confirmaron una pérdida de producción de hasta 6000kg ha^{-1} cuando el cultivo fue sometido a estrés hídrico durante la floración.

Con base a lo expuesto anteriormente, en este trabajo se ha estudiado la dinámica del agua de riego aportada en el cultivo de maíz. La finalidad de este estudio fue conocer los efectos del sistema de laboreo en el uso del agua en la agricultura actual, evitando la pérdida y/o degradación de los recursos hídricos.

MATERIAL Y MÉTODOS

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Zona de estudio

Este estudio se ha llevado a cabo durante los años 2012 y 2013 en la finca Zamadueñas (41° 42'23'' N, 4° 41'36''W), Valladolid, perteneciente al Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL) (Figura 2). El experimento se estableció en un suelo clasificado como Typic Xerofluvent (classification USDA 87) rico en limos, con un nivel alto de carbonatos, una capacidad de retención de agua de 175 mm m⁻¹. El pH osciló entre 8 y 8.5 y la cantidad de materia orgánica media fue de 0.5%. El perfil del suelo se caracteriza por su homogeneidad y ausencia de pedregosidad, lo que facilitó la toma de datos y muestras en campo.

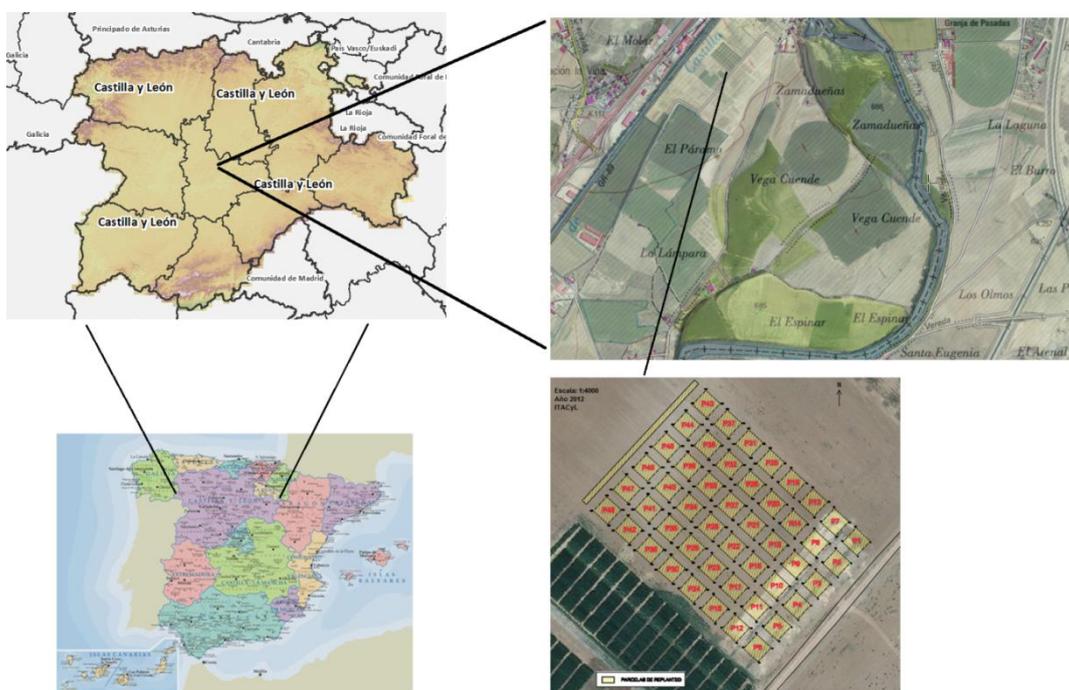


Figura 2. Zona de estudio y localización del ensayo en la finca Zamadueñas, Valladolid.

El clima es considerado como mediterráneo continental con veranos calurosos e inviernos fríos, la temperatura media anual es de 12.7°C y la precipitación anual 433 mm, de la cual al menos el 70% se produce entre septiembre y mayo. El mes más caluroso corresponde a julio, con una temperatura media de 22.3°C y una temperatura máxima de 30.7°C. Julio, además, es el mes con menor humedad relativa del año, 45%. Los meses más lluviosos son octubre y diciembre, con 55 y 53mm, respectivamente. La zona de estudio sufre 56 días de helada al año y más de 2600 horas de sol, de las cuales un 14% corresponden al mes de Julio. Los datos climáticos medios mensuales hacen referencia al periodo 1981-2010 (Tabla I). La estación

meteorológica de estudio se localizó en Valladolid: altitud (m): 735, latitud: 41° 38' 27" N, longitud: 4° 45' 16" O.

Tabla I. Datos climáticos del periodo 1981-2010 en la ciudad de Valladolid. Fuente: Agencia Estatal de Meteorología.

Mes	T med (°C)	T max (°C)	T min (°C)	HRmed (%)	Precip (mm)
Enero	4.2	8.2	0.2	83	40
Febrero	5.9	11.2	0.7	72	27
Marzo	9	15.2	2.8	62	22
Abril	10.7	16.9	4.6	62	46
Mayo	14.5	21	7.9	60	49
Junio	19.3	27	11.6	52	29
Julio	22.3	30.7	14	45	13
Agosto	22.1	30.1	14.1	48	16
Septiembre	18.5	25.6	11.3	56	31
Octubre	13.2	18.9	7.6	70	55
Noviembre	7.9	12.4	3.5	79	52
Diciembre	5	8.6	1.3	84	53
Año	12.7	18.8	6.6	64	433

T med= temperatura media del aire, T max =máxima temperatura del aire, T min= mínima temperatura del aire, HRmed= humedad relativa media, Precip (mm) = precipitación total acumulada cada mes en mm.

Los datos agroclimáticos correspondientes a las campañas de riego 2012 y 2013 fueron tomados por la estación meteorológica VA101, localizada a 1000m del experimento. En la Figura 3 se representan los diagramas ombrotérmicos correspondientes a los años de estudio, 2012 y 2013.

Los datos mostraron en 2013 unos meses de mayo y junio más fríos de lo habitual, con una temperatura media de 11 y 16.3°C, respectivamente, más de tres grados inferior a las registradas en 2012 durante los mismos meses. En 2012, el mes más caluroso fue agosto con una temperatura máxima de 30.2°C y en 2013, fue julio, con 32°C. 2013 presentó un verano más lluvioso de lo habitual, con más de 140mm de precipitación entre mayo y septiembre, un 155% superior a la precipitación de 2012. De estas precipitaciones, un 53% sucedieron en el mes de septiembre.

Tabla II. Condiciones climáticas durante los años de estudio 2012 y 2013.

Año	Mes	T med (°C)	T max (°C)	T min (°C)	HRmed (%)	Precip (mm)
2012	Mayo	16.0	23.4	8.3	59.4	7.2
	Junio	19.2	26.7	11.3	54.3	12.4
	Julio	20.4	28.8	11.7	50.5	12.2
	Agosto	21.5	30.2	12.7	47.6	1.4
	Septiembre	17.4	25.2	10.1	58.4	21.8
2013	Mayo	11.0	17.5	4.7	69.6	26.4
	Junio	16.3	23.9	8.7	62.5	28.7
	Julio	23.0	31.9	14.0	50.2	9.4

ESTUDIO DEL RÉGIMEN HÍDRICO EN EL SUELO
BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE LABOREO EN MAÍZ

Agosto	20.9	29.9	12.4	50.5	2.7
Septiembre	17.6	26.2	10.3	63.4	73.8

T med= temperatura media del aire, T max =máxima temperatura del aire, T min= mínima temperatura del aire, HRmed= humedad relativa media, Precip (mm) = precipitación total acumulada cada mes en mm.

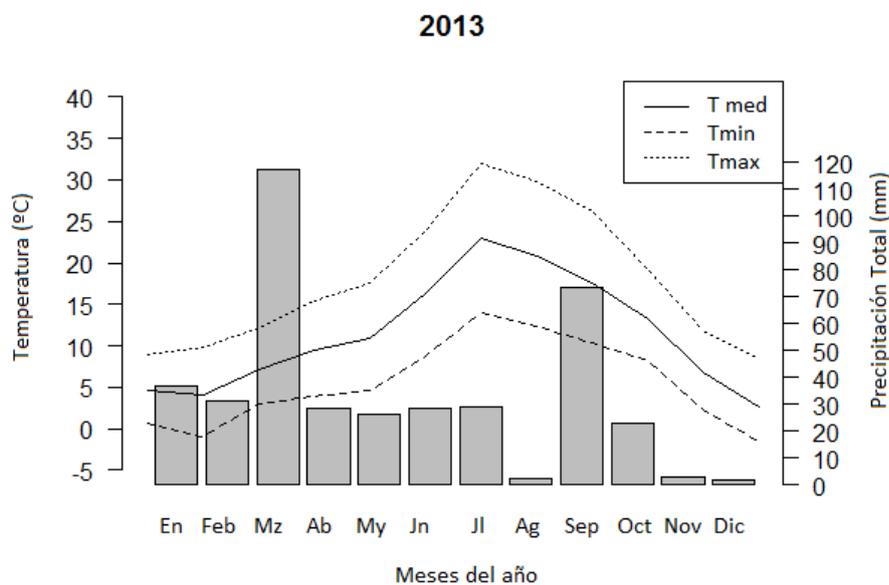
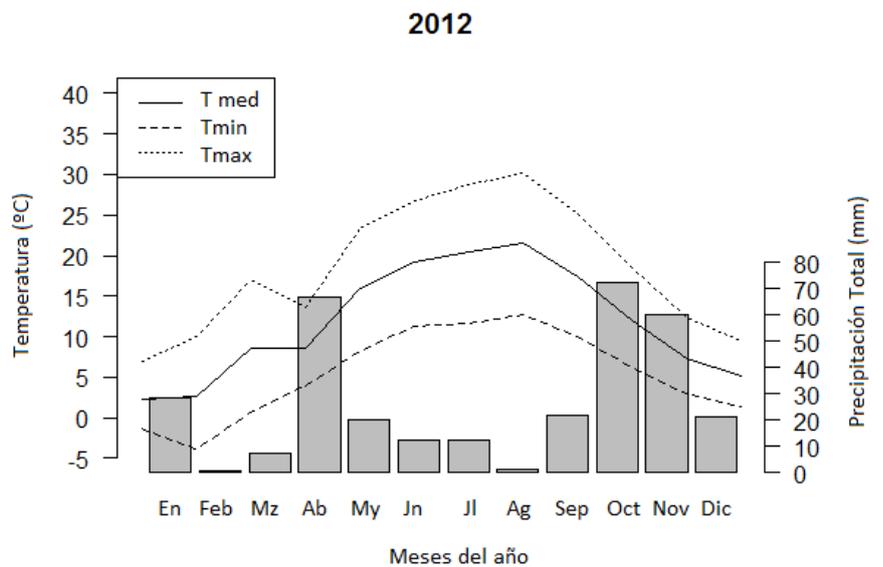


Figura 3. Evolución de la temperatura media, mínima y máxima durante las campañas de regadío 2012 y 2013 en el experimento. Datos recogidos por la estación meteorológica VA101.

3.2. Diseño experimental

El diseño experimental fue un split-split-plot con cuatro repeticiones donde el factor principal de estudio fue el sistema de laboreo, el segundo factor fue la rotación de cultivo y el tercer factor fue la fertilización nitrogenada de cobertera (Figura 4). Este estudio solo se ha realizado en las parcelas con monocultivo de maíz y fertilización nitrogenada convencional.

El experimento comprendió un total de 16 parcelas elementales de 144 m² destinadas al monocultivo de maíz. Los sistemas de laboreo utilizados fueron laboreo convencional y no laboreo. En este trabajo se ha estudiado la dinámica del agua de riego en maíz, ya que es uno de los cultivos que requiere un mayor aporte de agua y es más sensible a deficiencias de riego, por lo que cobra un mayor interés el estudio de la dinámica del agua de riego.

En cuanto a la fertilización de cobertera convencional (FC) se tomó como referencia la más usual en la zona o la indicada en bibliografía y la fertilización racionalizada (FR), calculada en función de la cantidad de nitrógeno en el suelo y las necesidades de la planta.

Este ensayo se implantó en Noviembre de 2010 sembrándose veza en todas las parcelas, con el fin de homogeneizar las propiedades del suelo y tener un punto de partida común para ambos sistemas de laboreo, LC y NL. Posteriormente, antes de la preparación de las labores de siembra del cultivo de maíz, en las parcelas de no laboreo, el cultivo de veza se quemó con un tratamiento de herbicida (glifosato) mientras que en las de laboreo convencional dicho cultivo se enterró mediante un pase de vertedera.

Las parcelas monitorizadas mediante la sonda de capatancia FDR fueron ocho, cuatro de ellas en LC y otras cuatro en NL.

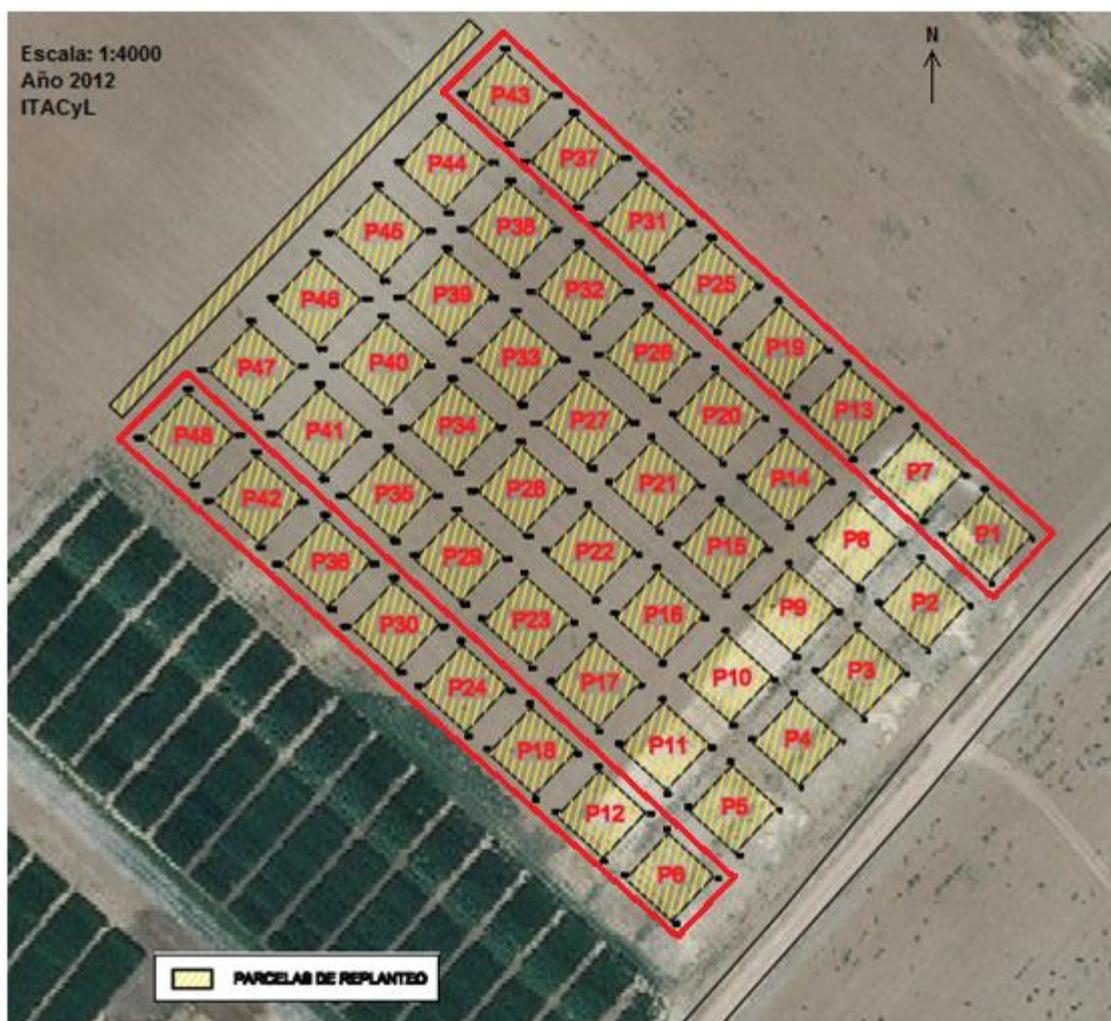


Figura 4. Fotografía aérea del ensayo (escala 1:4000) donde se delimita cada parcela y se indica el número de la misma. El conjunto de parcelas dentro de los recuadros rojos determinan el cultivo de maíz de este estudio, de ellas, las contenidas en el recuadro superior pertenecen al laboreo convencional y las del recuadro inferior al no laboreo.

3.3. Labores culturales

3.3.1. Laboreo, desarrollo y manejo del cultivo

El laboreo convencional consistió en un pase de vertedera en diciembre (modelo Kverneland VD85 de tres cuerpos), a una profundidad aproximada de 40cm. Esta labor fue seguida de un pase de cultivador de discos en abril (modelo Nodet gougis GC de cuatro cuerpos) a 15cm de profundidad.

El no laboreo consistió en un control químico con un herbicida total N-(phosphomethyl) glicinem, comúnmente denominado glifosato. Posteriormente se procedió a la siembra de maíz con una sembradora modelo SEMEATO SHMAA09.

En la Tabla III se muestra un resumen de las labores, tratamientos y fertilizantes aplicados en cada uno de los sistemas de laboreo en las dos campañas estudiadas. El cultivo de maíz de ciclo 450, variedad “Bergxxon 400” fue sembrado el 2 de mayo de 2012 en los dos sistemas de laboreo. En NL, el cultivo se sembró sobre el residuo previo de maíz del 2011. En la segunda campaña el cultivo de maíz de ciclo corto 300, variedad “Alixxia 300” se sembró el 9 de Mayo de 2013 (Figura 5). La distancia entre surcos fue de 55cm y 22cm entre plantas, obteniendo una densidad de 90000plha^{-1} . El cultivo fue cosechado el 13 y 9 de noviembre en 2012 y 2013 respectivamente.



Figura 5. Siembra de maíz en laboreo convencional y no laboreo respectivamente (05-05-13). Finca Zamadueñas 2013.

En cuanto a la fertilización, se realizó un abonado de fondo con una dosis de 800kg ha^{-1} con un fertilizante estándar NPK (8-15-15) y un abonado de cobertera con nitrato amónico cálcico (NAC 26%) bajo una dosis de 700 y 600kg ha^{-1} en FC y FR respectivamente, este fertilizante fue incorporado cuando el maíz tenía 8 hojas desarrolladas (V8 según Ritchie and Hanway, 1982).

Los tratamientos fitosanitarios aplicados en campo fueron los mismos en laboreo convencional y no laboreo, salvo que en este último se realizó un tratamiento de glifosato antes de siembra como alternativa al pase de vertedera y cultivador del laboreo convencional. En ambos sistemas de laboreo se aplicó un herbicida de contacto de pre-emergencia para adventicias de hoja ancha (Bromoxinil), y un herbicida de traslocación de post-emergencia aplicado cuando el maíz estaba en estado de 5-8 hojas desarrolladas (Clorpiralida) y Mesotriona 4% +Metacloro 40% como herbicida de absorción radicular y foliar cuando el cultivo tiene 2-4 hojas desarrolladas contra dicotiledóneas anuales.

El seguimiento de estados fenológicos del maíz (Figura 6 y 7) y control de malas hierbas se ha realizado semanalmente mediante identificación visual en cada una de las parcelas.



Figura 6. Fotografía tomada del maíz en laboreo convencional (19-08-13).



Figura 7. Plantas de maíz en no laboreo (08-07-13).

El riego se realizó mediante aspersión, con un marco de 12m*12m y un caudal medio de 5l h⁻¹. La cantidad de riego aplicada fue de 693mm y 544mm durante la campaña de 2012 y 2013 respectivamente; en periodos de máximas necesidades se realizó un fraccionamiento de la aplicación del riego de dos días a la semana con 4h cada uno, con el fin de maximizar la cantidad de agua aportada y reducir la posible lixiviación de la misma.

Tabla III. Labores preparatorias y culturales del cultivo de maíz realizadas en el ensayo de la Finca de Zamadueñas en las dos campañas estudiadas, 2012 y 2013.

LABORES PREPARATORIAS				
Laboreo convencional		No laboreo		
MAÍZ	Arado vertedera		Tratamiento herbicida	
	Cultivador		Siembra	
	Siembra			
SIEMBRA (VARIEDAD Y DOSIS)				
	Variedad		Dosis (plantas.ha ⁻¹)	
MAÍZ	Bergxxon (2012) y Alixxia (2013)		90000	
FERTILIZANTES				
	Fondo (8-15-15 NPK)	Cobertera (NO₃NH₄ 27%)		
		F. convencional	F. racional	
MAÍZ	800 kg.ha ⁻¹	700 kg. ha ⁻¹	600 kg. ha ⁻¹	
FITOSANITARIOS				
	Laboreo convencional		No laboreo	
	Clorpirifos 5%	15 kg. ha ⁻¹	Glifosato 36%	2.50 l.ha ⁻¹
	Mesotriona 4% + S-Metolacoloro 40%	3.50 l.ha ⁻¹	Clorpirifos 5%	15 kg. ha ⁻¹
	Clorpiralida 42.5 %	0.30 l.ha ⁻¹	Mesotriona 4% + S- Metolacoloro 40%	3.50 l.ha ⁻¹
			Clorpiralida 42.5 %	0.30 l.ha ⁻¹
	Bromoxinil 20%	2.25 l.ha ⁻¹	Bromoxinil 20%	2.25 l.ha ⁻¹

La cosecha mecánica del maíz se realizó a mediados de noviembre en ambas campañas, el modelo de cosechadora utilizada fue WINTERSTEIN con un metro de corte y dos surcos cosechados en cada maquinada. El número de maquinadas por parcela fueron tres, coincidiendo con los seis surcos centrales (Figura 8). Además, cuando el maíz se encontraba en estado de cosecha se tomaron muestras de biomasa vegetal. Se tomaron tres muestras por parcela con una superficie de un metro cuadrado (un metro lineal por dos surcos) y posteriormente se pesaron.



Figura 8. Cosecha mecánica del cultivo de maíz y equipo de toma de humedad, peso específico y peso del grano en campo.

3.3.2. Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente del suelo se siguió la metodología del cilindro (Porta et al., 1999), y el muestreo de suelo el 31-03-2011 consistió en tomar muestras de suelo a seis profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-100 cm (Figura 9) en 4 parcelas, dos de laboreo convencional y dos de no laboreo en dos fechas diferentes. El segundo muestreo se realizó el 07-03-2012 (Figura 10) y se tomaron muestras en dos parcelas, una en cada sistema de laboreo y las profundidades fueron de 0-10, 10-20, 20-30 y 30-40 cm.

Para la toma de muestras de suelo se introdujo un cilindro de 3 cm de altura y 5.35 cm de diámetro (67.44 cm^3 de volumen) en el suelo con ayuda de una sonda (Figura 10), se extrajo con la muestra de suelo y se enrasaron perfectamente ambas caras del cilindro con ayuda de un cuchillo, poniendo especial cuidado de no perder suelo y de que el exterior de la pared lateral del cilindro no tuviera tierra pegada. Posteriormente se sacó el suelo que contuvo el cilindro, se colocó en una bolsa de polietileno y se llevó al laboratorio. El suelo fue secado a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ y se determinó la densidad aparente relacionando el peso del suelo seco a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ con el volumen del cilindro con el que se trabajó. En la toma de muestras cada profundidad comprendió tres cilindros dispuestos uno al lado del otro en forma triangular (Figura 10) para así tener tres repeticiones de densidad aparente en cada profundidad.

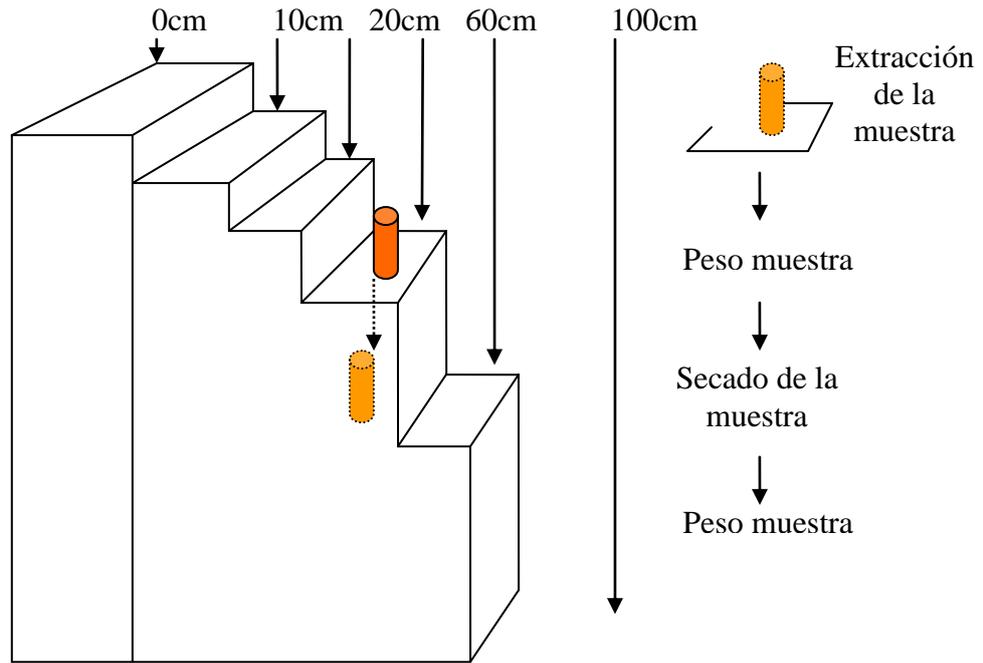


Figura 9. Proceso de la recogida de muestras para determinar la densidad aparente del suelo.



Figura 10. Recogida de muestras de suelo inalteradas para determinar la densidad aparente (07-03-12).

En el estudio también se determinó la densidad aparente del suelo en muestras alteradas (tamizadas a 2mm) que se recogieron el 26-07-2012. En el caso de las muestras de suelo alteradas, las profundidades estudiadas se tomaron cada 10cm hasta una profundidad de 60cm, estas muestras fueron recogidas para determinar las curvas características del suelo y la densidad aparente de las mismas la cual se obtuvo relacionando el peso seco de la muestra en un volumen conocido, tal y como se realizó en el caso de las muestras inalteradas

3.4. Métodos de medición del agua en el suelo utilizados en el estudio

La estimación de la humedad de un suelo es importante en agronomía para mejorar el uso del agua de riego. Con el sistema de no laboreo, el estudio de la cantidad y la dinámica del agua de riego a lo largo del perfil del suelo permitirá determinar si este sistema comparado con el de laboreo convencional, llega a retener mayor cantidad de agua temporalmente en el perfil del suelo, y con ello favorecer el mantenimiento y mejorar la estructura natural del suelo.

El contenido de humedad en el suelo se puede determinar de forma directa por gravimetría o volumetría. Sin embargo, en la actualidad existen diversos métodos indirectos para la medida del agua del suelo, en los que el contenido de humedad se obtiene mediante una relación calibrada con alguna otra variable medible. Estos pueden clasificarse en métodos volumétricos (aquellos que dan estimaciones de la humedad volumétrica del suelo) y métodos tensiométricos (aquellos que lo hacen de la tensión o potencial del suelo). Los métodos tensiométricos indican por tanto la energía necesaria para extraer el agua de los poros. Sin embargo, es posible convertir esta variable en contenido volumétrico de humedad mediante la curva característica del suelo. Por el contrario, los métodos volumétricos permiten conocer lo "lleno" que está el suelo y, expresan la humedad en términos de profundidad que puede ser comparada con otras variables hidrológicas como la lluvia, evapotranspiración, riego, etc. (Muñoz-Carpena et al., 2005).

En este estudio, la metodología llevada a cabo para conocer el contenido de agua fue mediante los métodos indirecto (tensiométrico y la sonda FDR (Frequency Domain Reflectometry) y directo (gravimetría) en el suelo ha sido la que se expone a continuación.

3.4.1. Indirectos

3.4.1.1. Tensiómetros

El tensiómetro es un tubo lleno de agua desgasificada que, insertado verticalmente en el suelo, une hidráulicamente el vacuómetro de su extremo superficial con el agua del suelo a través de la cápsula de porcelana porosa situada en su extremo inferior. El agua del suelo transmite su tensión a la columna de agua del tensiómetro produciendo un desplazamiento del agua del interior hacia el suelo. El agua de la columna a su vez tira del mecanismo del vacuómetro produciendo el desplazamiento mecánico de la aguja del dial (vacuómetro de Bourne), una depresión en la columna del manómetro de mercurio, o un impulso eléctrico a través de un transductor de presión.

En el ensayo científico donde se ha desarrollado el experimento, fueron instaladas cuatro baterías de tres tensiómetros cada una a las profundidades de 55cm, 105cm y

155cm. Dos de estas baterías en parcelas de no laboreo y dos en laboreo convencional. La localización de los tensiómetros coincidió con la del resto de equipos de medición del agua en el suelo. La instalación de las cañas tensiométricas se realizó con una barrena del mismo diámetro que el tensiómetro. Una vez perforado el suelo a la profundidad adecuada se llenó de barro hecho con el propio suelo extraído con la barrera para favorecer un contacto máximo entre la caña tensiométrica y el terreno. La instalación de todos los tensiómetros se realizó una vez comenzó la campaña del cultivo y se extrajeron del suelo antes de la cosecha, con el fin de no obstaculizar las labores del terreno y tratamientos.

La lectura de estos tensiómetros fue de tres veces por semana a primera hora de la mañana y junto con la lectura se comprobó que el equipo estuviese lleno de agua desgasificada.

3.4.1.2. Sonda FDR (Frequency Domain Reflectometry) DIVINER 2000

El equipo FDR Diviner 2000 consistió en una barra metálica, la cual, en uno de sus extremos posee una sonda, que al ser introducida y retirada del tubo de acceso a examinar, mide la frecuencia del campo electromagnético que se genera en el suelo. Dada la relación que existe entre esta frecuencia y la constante dieléctrica del suelo, a través de la capacitancia, el equipo determina el contenido de agua del suelo cada 10 cm, poseyendo un radio de acción de igual longitud. Este tipo de sistemas de medida ofrece algunas ventajas con respecto a otros métodos, como son la posibilidad de obtener un gran número de medidas, de forma continuada, y sin perturbar las propiedades del suelo; sin embargo tiene el inconveniente de que las lecturas que entrega están basadas en un modelo o ecuación de calibración obtenida para suelos diferentes a los del experimento, por lo que ha sido necesario calibrar esta sonda de acuerdo a los parámetros edáficos propios del suelo de Zamadueñas.

Los registros de humedad se expresan en mm por 10cm de profundidad, que es equivalente a decir mm por 100mm; es decir esto indicaría % de humedad.

La sonda FDR se basó en la medición de la constante dieléctrica para determinar el contenido de agua del suelo, midiendo el tiempo de carga de un condensador que utiliza el suelo como medio dieléctrico.

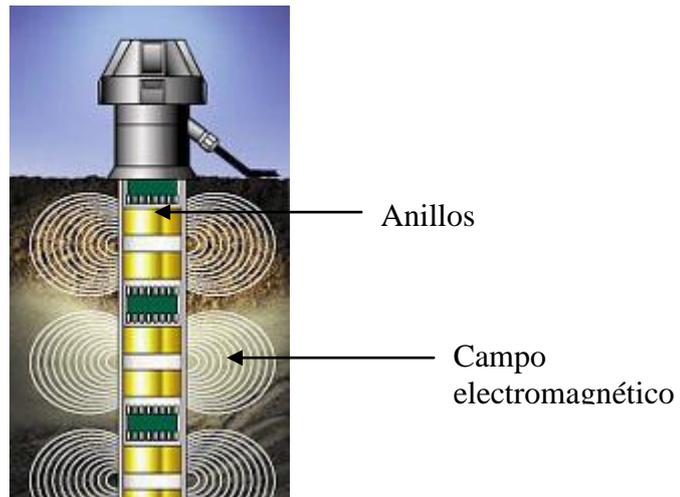


Figura 11. Esquema de un sistema Frequency Domain Reflectometry.

Se instalaron 9 tubos de acceso para la sonda FDR (Figura 12), 4 en parcelas de NL, otros 4 en parcelas de LC y uno en el pasillo. Todos los tubos se encontraron instalados a una distancia de aproximadamente 5m en línea recta desde el centro de la parcela.

La instalación de los tubos FDR tuvo lugar después de finalizar la siembra de maíz, con el fin de no obstaculizar la labor.

Los tubos son de PVC de 2m de longitud y 2 pulgadas de diámetro nominal (5,08cm) y su instalación se basó en hacer una perforación en el perfil del suelo con una barrena, de un diámetro semejante al del tubo de medición, esta perforación tuvo aproximadamente 1.80m de profundidad y el tubo de acceso se insertó en la abertura hasta que sobresalió de la superficie 10cm del mismo (para que la sonda comience a medir desde justo la superficie hasta 1,60m de profundidad). La parte inferior el tubo se encuentra provista de un tapón especial que cierra herméticamente el tubo y se coloca una vez instalado el mismo. La función de este tapón es evitar que cualquier materia externa al tubo de acceso pueda pasar al interior del mismo, imposibilitando la medición.



Figura 12. Equipo de instalación de los tubos de acceso, tensiómetros y equipos complementarios del régimen hídrico en el suelo.

El tubo fue totalmente hermético en sus paredes y fondo y fue instalado tomando la precaución de que las paredes externas del mismo estuviesen en contacto completo con el suelo en todo su perímetro (Figura 13).



Figura 13. Tubos de acceso para la sonda FDR en no laboreo.



Figura 14. Esquema del equipo de medición FDR, sonda y monitor de control y visualización.

Los tubos se retiraron del terreno tras finalizar la campaña, haciendo coincidir este hecho con las primeras lluvias para facilitar la extracción del equipo. El tubo correspondiente al pasillo se mantuvo instalado durante toda la campaña con el fin de comprobar, si fuese necesario, la humedad del suelo durante otras épocas del año.

La primera medición se realizó justo después de la instalación del equipo, con el fin de evaluar el correcto funcionamiento de la sonda. Las mediciones continuadas comenzaron la última semana de mayo, se tomaron mediciones de humedad tres veces por semana, lunes, miércoles y viernes, a primera hora de la mañana. La época de medición fue durante toda la campaña de riego y unas semanas después de haber finalizado, con el fin de estudiar el tiempo que tarda el suelo en secarse. Junto con

estas medidas se tomaron los datos correspondientes a los tensiómetros (instalados en las 4 parcelas de maíz).

Cada día que se midió con la sonda se descargan los datos en el ordenador, tanto el cómputo bruto como el valor dado por la sonda con la ecuación por defecto.

La sonda FDR se encontró calibrada en función de una ecuación por defecto que transforma los valores de frecuencia en porcentaje de humedad. Si se emplease la ecuación por defecto del equipo los datos de humedad determinados serían unos valores relativos. Con el objetivo de trabajar con datos absolutos de humedad de suelo, fue necesario definir una ecuación de calibración de la sonda FDR y para ello se estableció una correlación entre los datos de frecuencia dados por la sonda en un momento determinado y los valores reales de humedad volumétrica que tenía el suelo en ese mismo momento, determinados por gravimetría (Figura 15). Esta correlación fue el resultado de una colección de datos de cómputos brutos dados por la sonda y humedades gravimétricas, recogidos en varias fechas a lo largo de la campaña 2012 y 2013. Para determinar la humedad volumétrica, las muestras de suelo se recogieron cuatro veces a lo largo de la campaña de riego, durante 2012 y 2013. Las profundidades de muestreo se realizaron cada 10cm hasta una profundidad de 150cm. Los momentos de toma de muestra se hicieron coincidir cuando el suelo estaba seco, húmedo y saturado de agua, con el fin de aumentar el rango de valores y obtener una ecuación de calibración más precisa para el suelo del experimento.

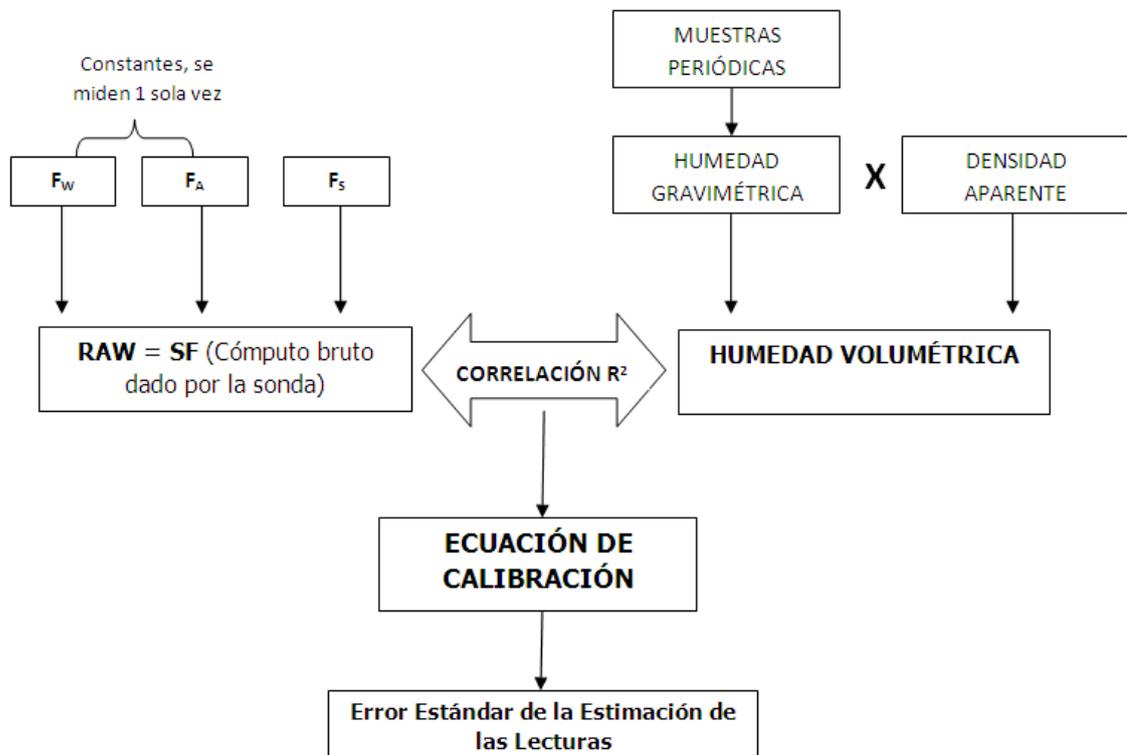


Figura 15. Esquema de los pasos seguidos para determinar la ecuación de calibración de la sonda FDR.

3.4.2. Directo o gravimétrico

La gravimetría es el método básico para la determinación del contenido en agua de los suelos. Muestras de suelo, de peso o volumen conocido, fueron recogidas y secadas en estufas, a 105°C hasta peso constante, mediante este procedimiento se obtuvo el valor de la humedad gravimétrica de cada horizonte estudiado, la humedad volumétrica se obtuvo multiplicando la humedad gravimétrica por la densidad del suelo correspondiente a cada profundidad.

La toma de muestras de suelo para la determinación de la humedad gravimétrica se realizó en las siguientes fechas y las profundidades estudiadas fueron las comprendidas cada 10cm hasta un metro de profundidad:

- 16-05-12
- 23-05-12
- 28-05-12
- 14-06-12
- 05-07-12
- 26-07-12

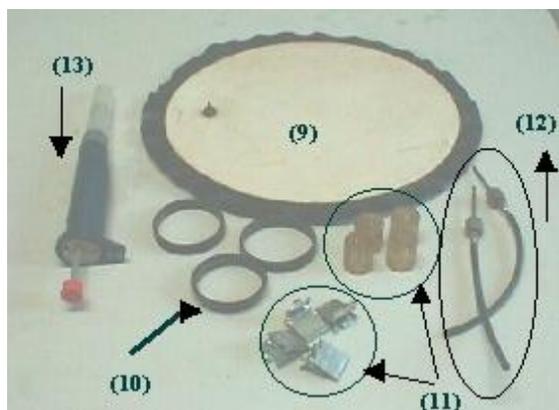
3.4.3. Determinación de las curvas características de humedad del suelo

Las curvas de retención de humedad en el suelo se han determinado mediante las membranas de presión de Richards (1947).

La membrana (placa) a presión desarrollada por Richards (Figura 16), es un método actualmente vigente debido a la simplicidad para determinar puntos de la curva de retención de tensiones elevadas (>100 kPa). El aparato utilizado estuvo formado por una cámara a presión hermética de acero (Figura 17), donde se colocaron las muestras en cilindros de acero de volumen conocido (10 muestras). En su base se colocó una placa cerámica semipermeable, que fue diferente en función del potencial matricial a determinar y que dejó drenar el agua extraída de las muestras a través de un colector. El proceso finalizó con el pesado de las muestras y secado a 105°C durante 24 horas. De esta forma, y por diferencia de pesos, se determinó el contenido hídrico de la muestra.

La curva de retención de humedad o curva de pF (pF es el logaritmo decimal de dicha medida: $PF = \log_{10} H$). Por ejemplo: 1 atm = 1000 cm = PF 3) fue la representación gráfica del contenido de humedad y la tensión con que estuvo retenida el agua en el suelo; en este estudio se determinó la curva de retención de humedad en la capacidad de campo y en el punto de marchitez, la curva característica estuvo definida cada 10cm en un perfil de suelo de 150cm. mediante la determinación de los dos parámetros anteriores se pudo estimar el agua útil del suelo.

El equipo de pF con el que se determinaron las curvas de retención de humedad del suelo en la capacidad de campo y punto de marchitez es el que muestra las Figuras 16, 17 y 18 y se compuso de las partes que se detallan numeradas en la Figura 16.



1. Filtro de aire
- 2 y 3. Reguladores
- 4 y 5. Manómetros
6. Compresor de aire
- 7 y 8. Cámara de presión
9. Plato cerámico
10. Aros de goma
11. Separador de platos

Figura 16. Membrana de Richards junto con el material necesario para el uso del equipo de pF para muestras de suelo.



Figura 17. Placa cerámica para el equipo de pF con cilindros de volumen conocido enumerados para su correcta identificación, y que posteriormente se llenarán de muestra suelo.

ESTUDIO DEL RÉGIMEN HÍDRICO EN EL SUELO
BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE LABOREO EN MAÍZ

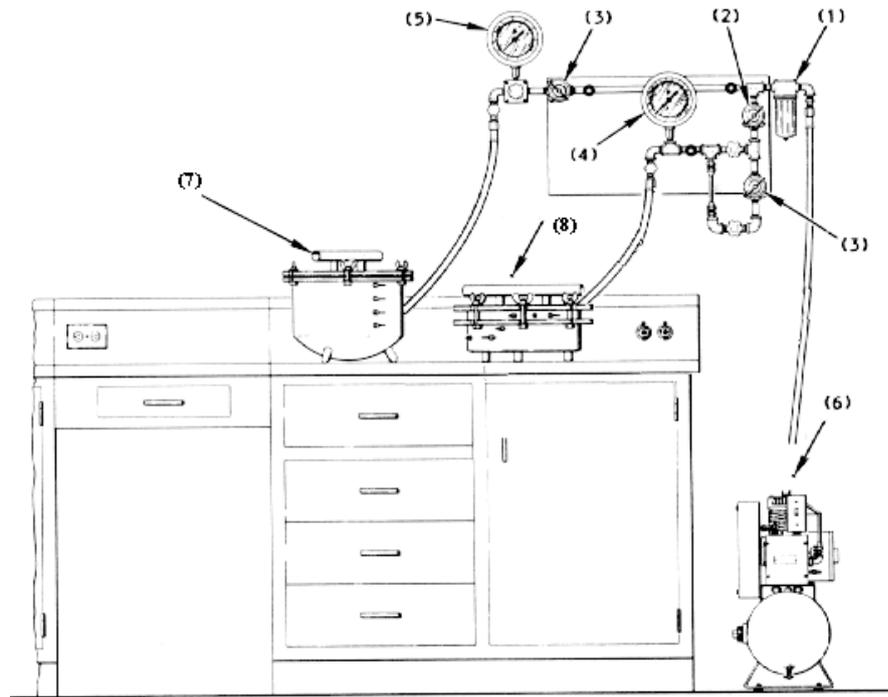


Figura 18. Esquema general del equipo de pF: 1. Vacuómetro, 2 y 3. Llave de presión, 4 y 5. Manómetros, 6. Generador, 7 y 8. Ollas de succión.

Las curvas características de humedad se determinaron en condiciones próximas a la capacidad de campo (pF 2.7) y punto de marchitez permanente (pF 4.2).

En la Figura 19 se muestra de forma gráfica la relación entre la humedad volumétrica del suelo y su equivalencia en pF y en atmósferas, también quedan representados los puntos de medición de pF del estudio, el correspondiente a la capacidad de campo (pF 2.5) y punto de marchitez (pF 4.2) quedando determinado el intervalo de humedad que corresponde al agua útil para el cultivo.

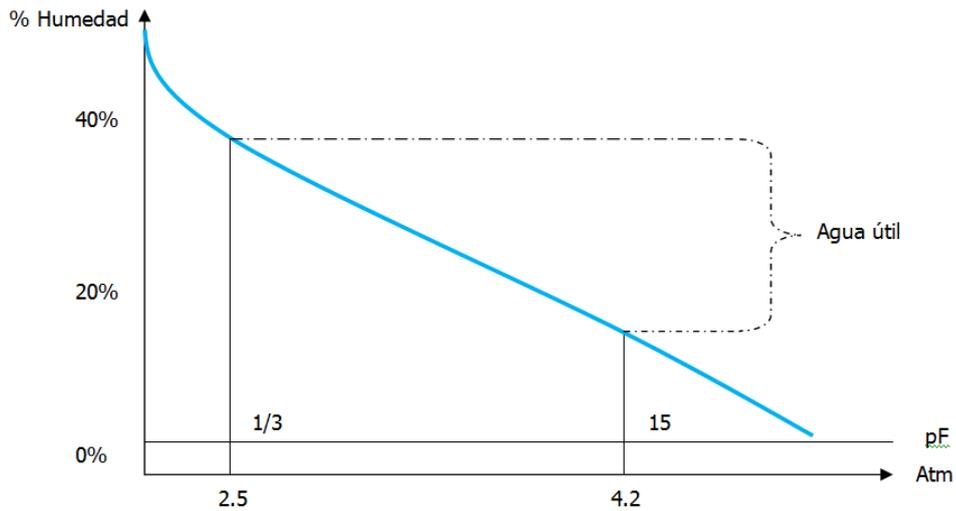


Figura 19. Relación entre la humedad volumétrica del suelo y su equivalencia en pF y en atmósferas.

3.4.4. Manejo del riego y determinación de las necesidades de agua en maíz

El balance hídrico ha sido calculado semanalmente durante toda la campaña de riego en función de las necesidades del cultivo y los aportes que se han realizado.

Las necesidades de riego fueron calculadas mediante la multiplicación de la evapotranspiración potencial (ET_0), definida por la estación meteorológica de trabajo, por un coeficiente K_c asociado al estado de desarrollo del cultivo, este coeficiente fue el resultado de la modificación de los valores determinados por la FAO, adaptados a la fecha de siembra y estados fenológicos del maíz en el experimento (Allen et al., 2006).

Para definir K_c del cultivo se tuvieron en cuenta los valores de K_c estimados por la estación meteorológica y los de la FAO, ambos se modificaron en función del estado de desarrollo del maíz en las distintas etapas de crecimiento, de este modo la evolución de los valores de K_c fue la expresada en la Figura 20.

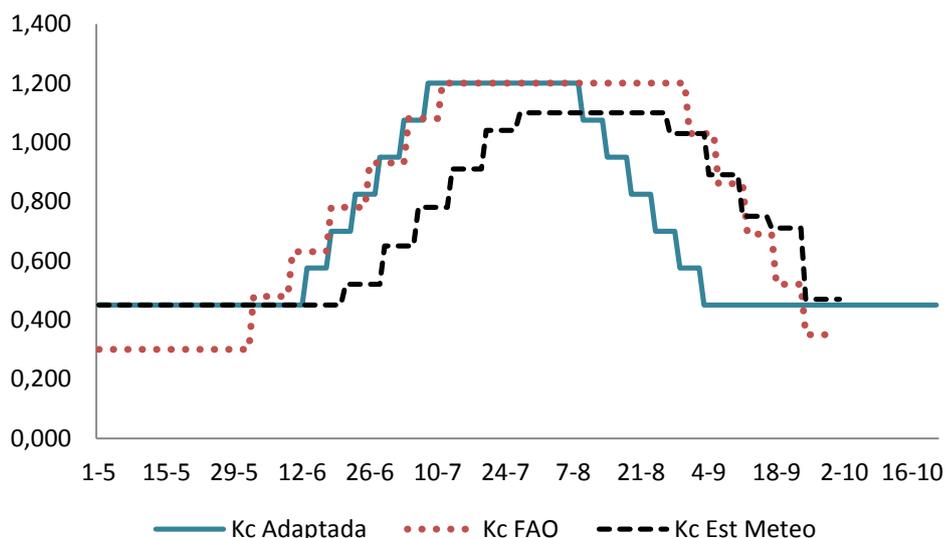


Figura 20. Evolución de Kc determinada por la FAO, por la estación meteorológica de trabajo y la adaptada al experimento en función de las etapas de crecimiento del cultivo.

Las necesidades de agua de riego calculadas *a priori*, no tuvieron en cuenta las características del suelo, su capacidad de retención o granulometría, por lo que la demanda de agua semanal se vio modificada por la distribución del agua en el perfil, determinada por el sensor FDR y también por la capacidad de campo y punto de marchitamiento analizados en laboratorio, tal y como se muestra en el apartado anterior. Esto explicó, que las necesidades establecidas por $ET_o \cdot K_c$, fueron contrastadas con la humedad volumétrica del suelo en cada horizonte de 10cm y se aportó una cantidad de agua idónea para mantener el suelo con una humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez.

Los aportes de riego por aspersión se calcularon en función del marco de implantación del maíz, 12m*12m, es decir 144m² por parcela y un caudal de riego de 5lm², cada parcela se dispuso con un aspersor central con un radio de alcance de 6m.

En la Tabla IV se muestra la evolución semanal del balance hídrico durante las campañas de riego de 2012 y 2013, donde se representaron los aportes de agua por riego y lluvia y las necesidades del cultivo en cada etapa de desarrollo. Finalmente en la Figura 21 se refleja el balance de agua en el suelo, que es la diferencia entre los aportes menos las necesidades; cuando estos valores fueron menores de cero se consideró que el cultivo sufrió un estrés hídrico, aunque estos resultados se contrastaron con la humedad volumétrica dada por la sonda FDR, la cual determinó finalmente si a pesar de no aportar el agua extraída, la humedad del suelo se mantuvo entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento. En la Figura 21 se observa como en 2012 los aportes de agua superaron las necesidades del cultivo, proporcionando un balance final positivo. En 2013, las necesidades y los aportes fueron más equilibrados, aunque en algunas épocas el balance final fue negativo.

ESTUDIO DEL RÉGIMEN HÍDRICO EN EL SUELO
BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE LABOREO EN MAÍZ

Tabla IV. Valores correspondientes a los componentes del balance hídrico, durante las cuatro semanas de cada mes de las campañas de riego 2012 y 2013.

semanas	Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	
2012	Eto (mm)	258	394	337	399	393	347	328	445	402	375	414	442	362	347	457	462	340	324	314	170
	Kc	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.58	0.7	0.83	0.95	1.08	1.2	1.2	1.2	0.95	0.83	0.7	0.58	0.45	0.45	0.45
	ETc (mm)	116	177	152	180	177	201	230	369	382	405	497	530	434	329	379	323	197	146	141	77
	Aportes (mm)	182	0	12	0	126	200	200	572	400	550	570	650	600	752	637	550	502	212	2	216
	Balance (mm)	66	-177	-140	-180	-51	-1	-30	203	18	145	73	120	166	423	258	227	305	66	-139	139
2013	Eto (mm)	250	254	176	335	357	340	340	467	452	496	470	440	425	450	426	395	301	306	785	172
	Kc	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.58	0.7	0.83	0.95	1.08	1.2	1.2	1.2	0.95	0.83	0.7	0.58	0.45	0.45	0.45
	ETc (mm)	103	114	79	151	160	153	156	259	312	408	459	472	467	495	469	413	243	241	229	68
	Aportes (mm)	100	92	158	14	224	31	232	0	200	276	268	450	414	450	400	400	455	250	300	723
	Balance (mm)	-3	-22	79	137	64	122	76	259	112	132	-191	-22	-53	-45	-69	-13	212	9	71	655

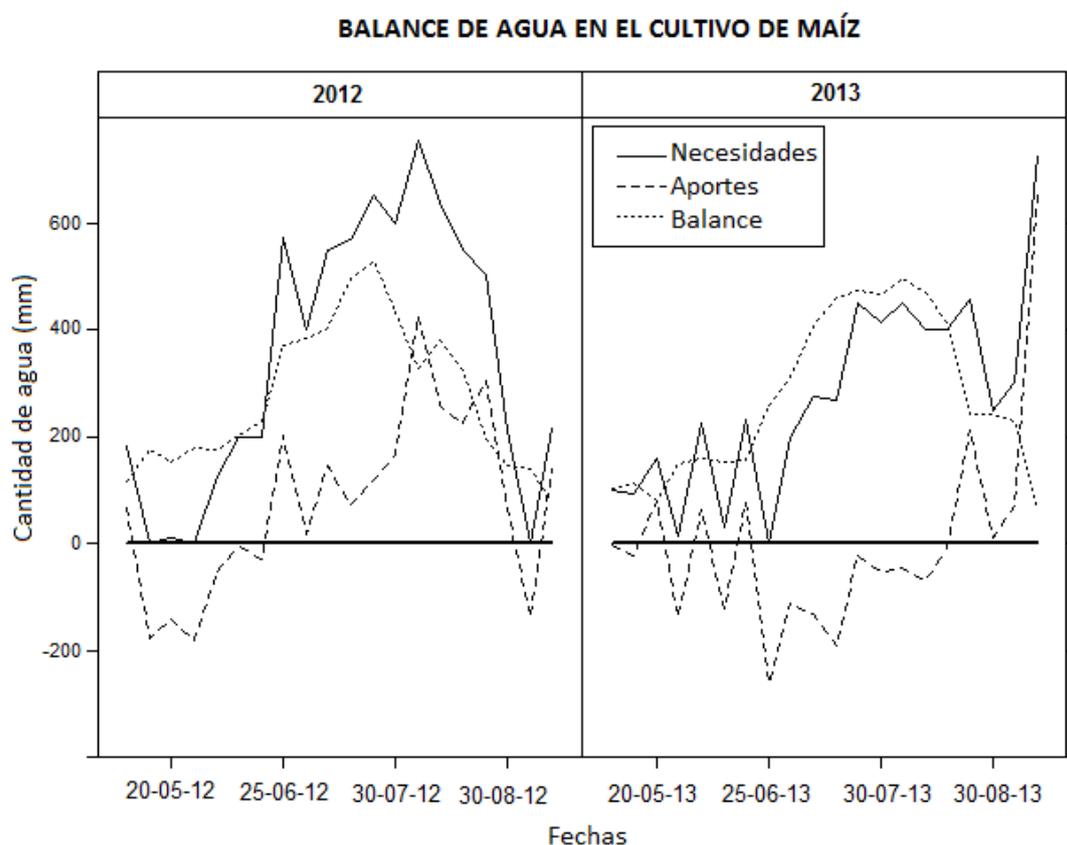


Figura 21. Evolución del balance hídrico durante las campañas de cultivo 2012 y 2013.

3.5. Análisis estadístico

El programa estadístico utilizado en este trabajo ha sido R Comander.

El análisis estadístico comenzó con un estudio de normalidad de las distribuciones y la homogeneidad de la varianza mediante el procedimiento o módulo *nortest*. Cuando los datos cumplieron los requisitos de normalidad, se empleó una estadística paramétrica y en el caso de no presentarla, se transformaron con el logaritmo natural. En los casos en los que los datos no cumplieron los requisitos de normalidad, a pesar de la transformación de variables, se optó por utilizar estadística no-paramétrica.

Para comparar los distintos tratamientos se realizaron análisis de varianza ANOVA y análisis multivariante MANOVA. El nivel de significación empleado fue $P < 0.05$. Para el diseño Split-plot de este trabajo se utilizó el módulo *agricolae*.

Se realizó test LSD (least significant difference), que es la diferencia entre dos medias, basadas en la prueba t de Student, empleando el valor de la varianza del error. Para determinar grupos homogéneos se utilizó el test de Tukey-Kramer.

Se realizaron correlaciones de Spearman y correlaciones de Pearson, para observar el grado de asociación o independencia entre variables. Estas correlaciones se complementaron con gráficos de regresión lineales y no lineales con la intención de observar las relaciones entre variables y las principales tendencias. Los modelos no lineales diseñados fueron los que mejores se ajustaron a la distribución de los datos, de este modo se ha realizado una valoración de todos los modelos posibles y se ha seleccionado el más significativo un con un mayor valor de R^2 . Los procedimientos o módulos de R utilizados para determinar las regresiones entre variables fueron: *agricolae* y *corrperm*. Los principales modelos utilizados son los siguientes:

Michaelis-Menten: $f(y) = (\alpha * x) / (\beta + x)$

Exponencial: $f(y) = \alpha * e^{(\beta * x)}$

Asintótica exponencial: $f(y) = \alpha + (\beta - \alpha) * e^{(-c * x)}$

La representación gráfica de los resultados estadísticos se realizó con los paquetes *lattice* y *graphics*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Densidad aparente

4.1.1.1. Muestras de suelo inalteradas

En Tabla V se muestran los valores medios de densidad aparente de muestras inalteradas para cada una de las profundidades del perfil del suelo en dos sistemas de laboreo en 2011 y 2012. Los horizontes superficiales del suelo presentaron unos valores de densidad aparente significativamente menores que los profundos y a medida que la profundidad aumentó también lo hizo la densidad del suelo, estos resultados coinciden con los de Cresswell y Hamilton (2002) los cuales determinaron un aumento de la densidad aparente conforme aumenta la profundidad. El análisis estadístico no determinó que el factor sistema de laboreo influyese de forma significativa en la variable densidad aparente del suelo ($P=0.89$), este resultado era esperado ya que las muestras se recogieron en una fase inicial, primer y segundo año, tras la implantación del no laboreo (Tabla V). Da Silveira (2008) determinó en maíz un aumento de la densidad del suelo a corto plazo y una disminución de la porosidad en el NL, sin embargo, a largo plazo, la densidad del suelo en NL tendió a disminuir. Mati (2007), en un estudio de seis años realizado en Eslovaquia sobre un suelo fluvisol gleico, la densidad aparente en NL aumentó un 1.54% y la porosidad disminuyó un 1.32% en relación al LC. Tormena (2002) y Ozpinar (2015), también observaron una mayor densidad aparente de 0-10cm en NL. Los efectos del NL sobre la disminución de la densidad aparente del suelo en maíz generalmente se observa a partir del cuarto año tras la implantación del sistema de laboreo (Corsini et al., 1999)

Los resultados estadísticos confirmaron que la profundidad del perfil del suelo y el año en el que se tomaron las muestras sí influyeron de forma significativa en los valores de densidad aparente del mismo, ($P<0.01$) ($P<0.05$) respectivamente (Tabla V). De este modo en 2011 la media de la densidad aparente fue de 1.46g/m^3 mientras que en 2012 esta variable fue de 1.55 gm^{-3} de media.

Tabla V. Valores de la densidad aparente media, mínima y máxima, junto con el error estándar de la media, en cada una de las profundidades de medición y año de toma de muestras en función del sistema de laboreo.

Profundidad (cm)	LABOREO CONVENCIONAL				NO LABOREO				
	Media (gm ³)	Error Est	Min (gm ³)	Max (gm ³)	Media (gm ³)	Error Est	Min (gm ³)	Max (gm ³)	
2011	0-10	1.27b	0.05	1.16	1.38	1.24b	0.07	1.10	1.40
	10-20	1.47	0.04	1.40	1.58	1.39ab	0.03	1.34	1.50
	20-30	1.41ab	0.06	1.24	1.51	1.55	0.06	1.45	1.69
	30-40	1.57	0.04	1.49	1.66	1.52	0.02	1.47	1.58
	40-60	1.52	0.03	1.44	1.60	1.54	0.01	1.52	1.57
2012	60-100	1.54	0.02	1.50	1.58	1.55	0.02	1.51	1.60
	0-10	1.60	0.02	1.55	1.63	1.59	0.03	1.52	1.63
	10-20	1.552	0.068	1.427	1.662				
	20-30	1.590	0.025	1.540	1.620	1.538	0.034	1.473	1.586
	30-40	1.465	0.014	1.445	1.492	1.533	0.015	1.507	1.558

En la Figura 22 se observa como ambos sistemas de laboreo presentaron una menor densidad aparente en los primeros horizontes de profundidad (0-20cm), este hecho fue más acusado en no laboreo, debido probablemente a la presencia de restos vegetales. El no laboreo mostró un valor de densidad aparente máxima a más profundidad que el laboreo convencional, a 20-40cm y 10-20cm respectivamente, esto pudo deberse a la mayor compactación del terreno debido a la labor, aunque recordemos que estadísticamente el sistema de laboreo no ha mostrado diferencias significativas. Se muestra finalmente como la densidad aparente aumentó conforme a la profundidad, debido a cambios en el material edáfico (Corns 1987; Harvey et al., 1997).

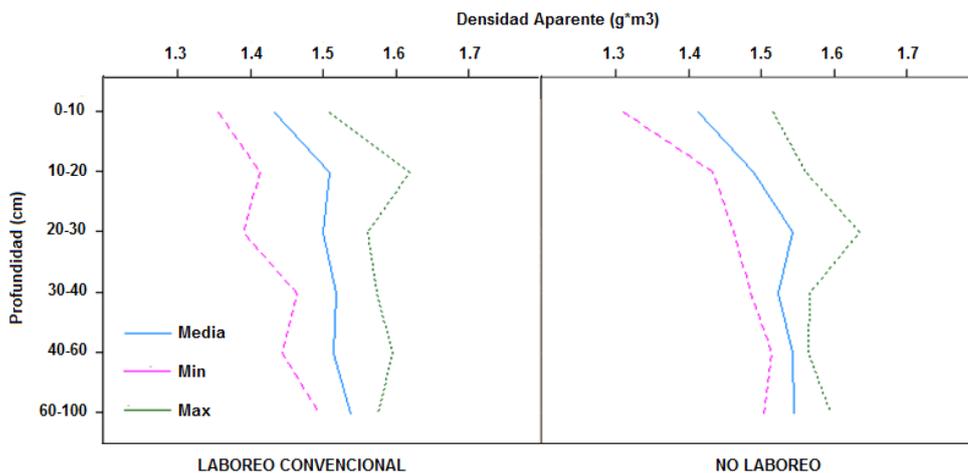


Figura 22. Evolución de los valores de densidad aparente media, mínima y máxima por profundidad y sistema de laboreo.

En el momento de determinar las curvas de pF, se aprovechó el suelo para determinar la densidad aparente en muestras de suelo alteradas. En este caso, los factores sistema de laboreo y profundidad no afectaron de forma significativa al comportamiento de esta variable. Los resultados obtenidos se debieron a que al tamizar el suelo, éste perdió su estructura, por tanto este factor determinante quedó anulado.

4.2. Curvas características de humedad

En la Figura 23 se muestran las curvas de pF en el perfil del suelo. Se pudo observar el sistema de laboreo no influyó significativamente en las curvas características de humedad en los dos sistemas de laboreo, ya que ambos suelos presentaron una textura semejante en las muestras alteradas, tamizadas a 2mm.

En cuanto a las curvas características de retención de humedad en el suelo, los valores medios de capacidad de campo en ambos sistemas de laboreo oscilaron entre 33.1% y 25.1% de humedad volumétrica. Los valores más altos corresponden al horizonte de suelo comprendido entre 50cm y 80cm, coincidiendo con la profundidad de extracción máxima de agua del cultivo de maíz. En el caso de la curva de retención de humedad en el punto de marchitez permanente, el valor máximo de humedad fue de 14.4% a 150cm de profundidad y 10.5% el mínimo, en el horizonte de 100cm.

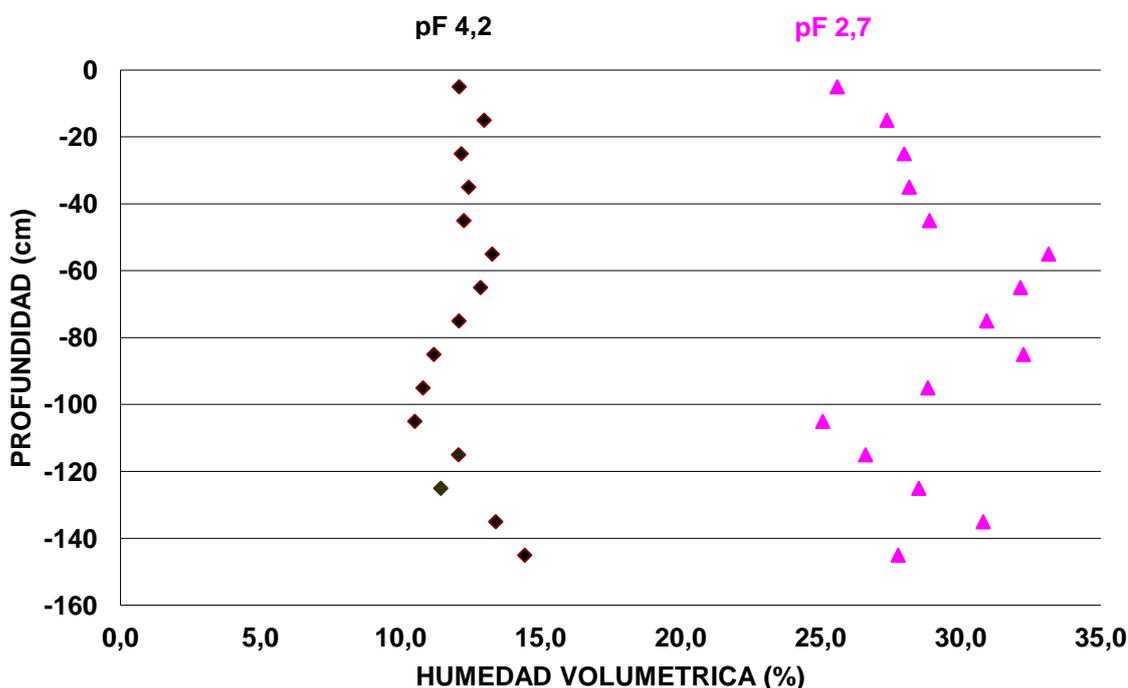


Figura 23. Curvas características de retención de humedad en capacidad de campo y punto de marchitez a lo largo del perfil del suelo, pF4.2 = Punto de marchitez y pF2.7 = Capacidad de Campo.

4.1. Calibración de la sonda FDR

Se intentó obtener una ecuación de calibrado adecuada al suelo del ensayo, para ello se estableció una correlación entre la humedad volumétrica obtenida por gravimetría y el cómputo bruto dado por la sonda, esta correlación se realizó para cada sistema de laboreo y por grupos de profundidades. Los coeficientes de correlación obtenidos fueron lo suficientemente bajos como para rechazar la ecuación conseguida (Figura 24). Por tanto, se utilizó una calibración bibliográfica obtenida por Groves y Rose (2004) en la estimación de la humedad del suelo, esta ecuación se seleccionó en función de la densidad aparente y la textura del suelo (Tabla VI). Paltineanu y Etarr (1997) mencionan que las diferencias en la mineralogía del suelo, especialmente arcillas, podrían afectar a las lecturas SF.

Diversos autores han tratado de desarrollar ecuaciones de calibración de equipos FDR. Groves y Rose (2004), con un equipo Diviner 2000, en laboratorio, lograron ecuaciones para seis suelos distintos (Tabla VII), cuyos R^2 variaron entre 0,93 y 0,97. Aunque el fabricante de la sonda Diviner2000 no especifica en qué condiciones desarrolló sus ensayos, se supuso que fue en condiciones de laboratorio.

Tabla VI. Ecuaciones de calibración de la sonda de capacitancia Diviner 2000, R^2 = coeficiente de determinación, σ = desviación típica, SF = Frecuencias normalizadas y θ_v = humedad volumétrica ($m^3 m^{-3}$).

Calibración	Ecuación	R2	σ	RMSE
Calibración Fabricante	$SF = 0.494\theta_v^{3.017}$	0.99	*	0.022
Calibración Propia	$1/SF = (\theta_v^3)/1000$	0.75	0.153	0.09
Fares <i>et al.</i> (2004)	$SF = 0.440\theta_v^{2.533} - 0.40$	0.88	0.029	*
Andrade <i>et al.</i> (2007)	$SF = 0.397\theta_v^{2.533}$	0.97	0.011	*

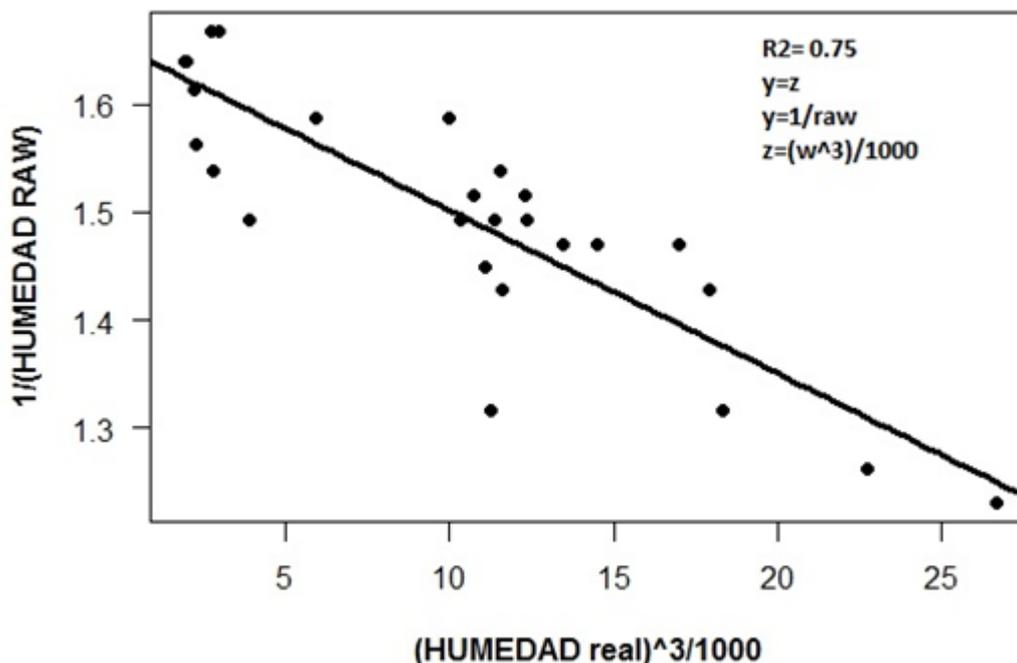


Figura 24. Calibración propia de la sonda FDR Diviner 2000 para muestras de suelo recogidas en el ensayo de Zamadueñas.

Tabla VII. Ecuaciones de calibrado y densidades medias del suelo obtenidos por Groves y Rose (2004).

Textura del suelo	Ecuación de la calibración			Densidad aparente media del suelo (gcm^{-3})
	Diviner 2000	R2	P. valor	
Arenoso	SF = 0.2162qv0.4149	0.97	<0.001	1.58 (+/- 0.10)
Franco-arenoso	SF = 0.2532qv0.3628	0.97	<0.001	1.44 (+/- 0.10)
Franco-arcilloso	SF = 0.3531qv0.2621	0.96	<0.001	1.39 (+/- 0.08)
Arcilloso	SF = 0.3107qv0.2966	0.93	<0.001	1.09(+/- 0.07)
Arogánico franco-arenoso	SF = 0.1765qv0.4434	0.97	<0.001	1.02 (+/- 0.08)
Órgano-mineral	SF = 0.2161qv0.3785	0.97	<0.001	0.83 (+/- 0.14)

4.2. Influencia del laboreo en la dinámica del agua en el suelo

El sistema de laboreo afectó significativamente al contenido de humedad volumétrica del suelo en cada una de las diferentes profundidades (Figura 26). También se observó que el contenido de agua en el suelo fue significativamente mayor en 2013 que en 2012, debido a las abundantes lluvias primaverales que recargaron el perfil del suelo (Figura 26).

El contenido de humedad volumétrica fue significativamente mayor en el tratamiento correspondiente a no laboreo ($p < 0.05$) sobretodo en las profundidades que coincidieron con la profundidad de extracción de agua del cultivo y en los momentos

de máximas necesidades hídricas en maíz, desde el julio hasta mediados de agosto (Figura 26 a, b, c, A, B y C). De este modo, durante los periodos de mayor demanda de agua por parte de la planta, las parcelas de NL fueron capaces de retener una mayor humedad en los primeros horizontes (10-40cm) donde se encontraron la mayor actividad radicular y mayor consumo de nutrientes que han de ser disueltos en agua. Este hecho posiblemente sucedió debido a que el sistema de NL redujo las pérdidas de agua por evaporación y los microorganismos, que descomponen la materia orgánica, provinieron al suelo de carbono y de nitrógeno enriqueciéndolo por tanto de nutrientes disponibles para la planta. Esta actividad microbiológica también favoreció la creación de macroporos en el suelo capaces de retener más agua (Shelton et al., 2000; Crovetto, 2006; Klocke et al., 2009; van Donk et al., 2010). Otro motivo por el cual se determinó que el sistema de NL fue capaz de retener más agua en el perfil del suelo se debió a que los restos de cosecha de este cultivo, muy ricos en lignina, se degradaron muy lentamente sobre la superficie del suelo, actuando como una capa aislante que además produjeron sombra en el suelo, evitando así las pérdidas de agua por evaporación y manteniendo al suelo más fresco que el LC cuando la temperatura ambiental fue un factor de estrés para la planta. Además gracias los restos de cosecha de maíz el suelo queda protegido del viento evitando pérdidas de nutrientes por erosión (Shelton et al., 2000). Por lo que se podría deducir que manteniendo los restos de cosecha del cultivo precedente sobre la superficie del suelo implicó una menor tasa de evaporación del agua de riego, debido a la mayor retención de ésta por la estructura del suelo, el efecto aislante de los residuos y la menor temperatura del suelo, este hecho fue constatado por numerosos autores como, Klocke, (2009) y Galantini (2006) en proyectos llevados a cabo por el departamento de agricultura de los EEUU (USDA) y en la Pampa, Argentina, respectivamente. Kenney (2015), en un estudio de tres años realizado en Kansas, EEUU, en el cultivo de maíz bajo NL, concluyó que un aumento de los restos de cosecha sobre la superficie del suelo incrementó la retención de agua en los horizontes superficiales del suelo y disminuyeron la temperatura del mismo durante el verano en una media de 5°C. Sin embargo una disminución parcial de los restos de cosecha aumentó el rendimiento de maíz, aunque aumentó a su vez el riesgo de erosión y pérdidas de humedad del suelo. Silva (2015) concluyó que el sistema de NL redujo el consumo de agua y optimizó su uso por las plantas de maíz.

En contraposición, Blanco-Canqui (2014) en un estudio de tres años de monocultivo de maíz, no observó diferencias significativas en la acumulación ni en en la infiltración de agua entre sistemas de laboreo.

En este estudio se comprobó que la temperatura del suelo resultó más baja durante el verano en las parcelas de NL que en las de LC, con una media de 1°C menor en los primeros 10cm de suelo (Figura 25), este resultado avaló el hecho de que las parcelas con NL mantuvieron la superficie del suelo más fresca y evitó así un mayor grado de evaporización del agua. A través del sistema de NL la estructura del suelo se mantuvo

inalterada favoreciendo una mejor distribución y penetración, y por tanto funcionamiento, de las raíces de maíz; además este sistema favoreció la formación de canales de exudados gracias a los microorganismos, provocando una agregación de las partículas del suelo y mejorando la estructura de éste (van Donk et al., 2010, Blanco-Canqui, 2014). En el caso del sistema de LC existió la posibilidad de formación de costras debido al pase de vertedera y además conllevó la destrucción de la estructura de los horizontes del suelo e hizo que el agua no fuese retenida en el perfil y rápidamente pasase a capas más profunda, pudiéndose perder por drenaje, con la consecuente lixiviación de nutrientes (Ji, 2014).

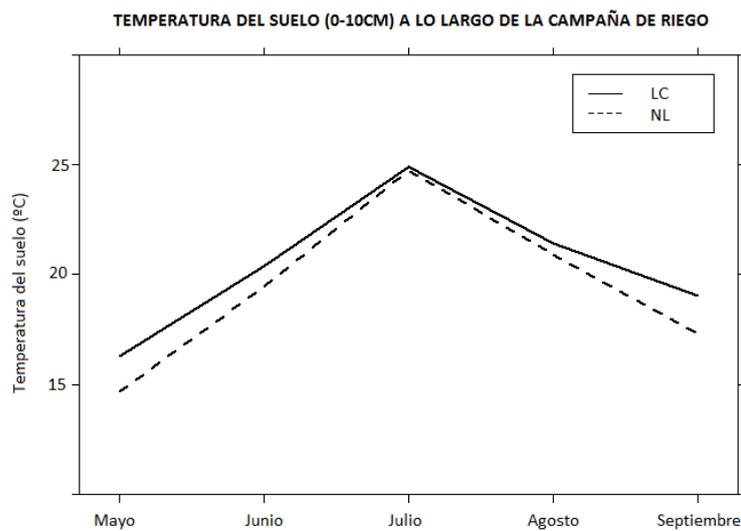


Figura 25. Evolución de la media de la temperatura de la superficie del suelo (10cm) a lo largo de la campaña de riego en maíz. LC, laboreo convencional, NL, no laboreo.

La máxima humedad volumétrica, $0.35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, se observó en las parcelas de NL en agosto de 2013 (Figura 26c), concretamente a la profundidad de suelo comprendida entre 30 y 40cm; simultáneamente las parcelas de LC contenían un 57% menos de humedad del suelo ($0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). El valor mínimo de contenido de humedad ocurrió en septiembre bajo LC, $0.09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el horizonte de 10 a 20cm (Figura 26a). El sistema de NL contuvo un mayor contenido de humedad volumétrica en los primeros 100cm de suelo durante toda la campaña de crecimiento del maíz, así, las mayores variaciones en humedad sucedieron en los horizontes de 10 a 80cm en NL y de 10 a 120cm en LC. Además, el NL el suelo mantuvo una humedad sin variaciones significativas a partir de los 80cm lo que evitó un estrés hídrico de la planta cuando la profundidad de extracción de nutrientes por parte de las raíces fue igual o superior a 80cm, sin embargo, en el caso de LC las variaciones en el contenido de agua oscilaron entre la superficie y los 120cm, lo cual pudo dificultar la obtención de agua y nutrientes en casos de déficit hídrico, ya que se mantuvo de forma irregular en la profundidad de extracción de agua de las raíces de maíz.

Estos resultados coincidieron con los propuestos por Munodawafa (2008) en un estudio de tres años en Zimbabue donde se concluyó que el sistema de LC producía una mayor escorrentía y pérdidas por drenaje que el de NL, además el laboreo de conservación favoreció la recarga de agua del perfil del suelo y obtuvo mayores rendimientos de maíz a pesar de que hubo momentos de déficit hídrico a lo largo de la campaña.

Como muestra la Figura 26 A, B, C y a, b, c, el sistema de laboreo afectó de forma significativa al contenido de humedad en los diferentes horizontes o capas de suelo; además se observó que el sistema de NL retuvo mayor humedad volumétrica que el de LC en todos los horizontes del perfil.

En cuanto a la reserva de agua en el perfil, ambos sistemas de laboreo presentaron un balance positivo en septiembre de 2013. Numerosos autores observaron que el sistema de NL fue capaz de mejorar la capacidad de retención de agua en el suelo, y como consecuencia, se mejoró la germinación de la semilla y se facilitó el desarrollo fenológico de la planta en las fases más vulnerables a la falta de agua en el suelo (Zhuang et al., 2001, Wuest, 2005). Concretamente en este estudio, el sistema de NL dificultó la germinación del maíz debido a la abundancia de restos de cosecha del cultivo anterior, los cuales impidieron un contacto íntimo entre la semilla y el suelo, favoreciendo que éstas quedasen a la intemperie y fueran comidas por los pájaros o se helasen ante condiciones climatológicas adversas. La cantidad de restos vegetales post-cosecha fue de 11.0tha^{-1} en las parcelas de NL frente a 1.45tha^{-1} en las de LC.

El sistema de laboreo afectó de forma significativa a la humedad del suelo en las diferentes profundidades del perfil, esto se pudo observar en las capas superficiales del suelo en el año 2013. Este hecho fue más notorio en periodos de máximas necesidades, sobre todo durante el mes de agosto. En agosto, las parcelas de NL fueron capaces de acumular más agua en el perfil que durante el resto de la campaña. Las capas correspondientes a 20-30 y 30-40cm mostraron un comportamiento similar, acumulando más de 10mm de agua en cada uno de los riegos (Figura 26 a). En el caso de las parcelas de LC, estas capas fueron menos sensibles a los aportes de agua, sobre todo durante el mes de agosto, donde se observó una descarga en el horizonte de 20-30cm en los periodos de máximas necesidades (Figura 26 b). El perfil se recargó de agua nuevamente en septiembre. Estos resultados están en contradicción con los recogidos por Gruber (2011), el cual determinó que no existían diferencias significativas entre sistemas de laboreo en los primeros 30cm de suelo. Petry (2007) y Ozpinar (2015) concluyeron que el sistema de LC mejoró el desarrollo y penetración de las raíces y por tanto la captura de agua. Sin embargo, los resultados de este estudio se mantienen en consonancia con los obtenidos por diversos autores (Tripplett y Dick, 2008; Alvarez y Steinbach, 2009; Lamm, 2009), los cuales concluyeron que el laboreo destruyó la conectividad natural de los distintos horizontes del suelo, favoreciendo la evaporación del agua y evitando su correcta distribución a lo largo del perfil. Moreno (2013) y Schwartz (2010), en ensayos llevados a cabo en España y Texas

respectivamente, determinaron que el laboreo favoreció la rápida infiltración del agua a través del perfil del suelo debido a la pérdida de estructura del mismo, lo que implicó una pérdida más rápida de humedad del suelo que el sistema de NL. Sime (2015) determinó que el sistema de NL incrementó la conservación de humedad en el perfil del suelo, haciendo que el maíz sufra menos la variabilidad de los aportes de agua.

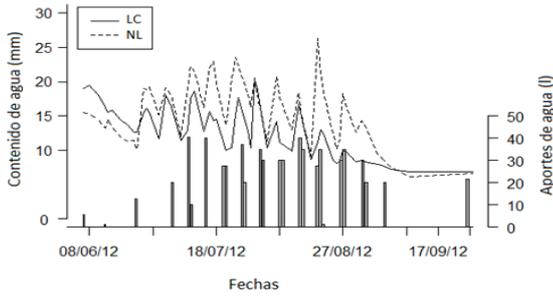
Durante los primeros y últimos estados fenológicos del cultivo de maíz las necesidades de agua fueron menores a las requeridas durante el resto de la campaña. En 2013, la campaña comenzó en mayo con el perfil del suelo, en las primeras capas, recargado al 30% del agua útil (Figura 26 A) Además, en 2013, se comprobó que durante julio y agosto, temporada de máximas necesidades de agua, las parcelas de LC no fueron capaces de retener en el tiempo el agua de riego en el suelo y durante estos meses cada una de las capas perdió más de 20mm de contenido de agua. Esto fue debido a que este sistema de laboreo permitió la evaporación del agua en las capas de suelo más cercanas a la superficie. Además, la pérdida de estructura debido al pase de vertedera, favoreció el rápido drenaje del agua de riego. Esto no ocurrió en el sistema de NL, el cual fue capaz de mantener el contenido volumétrico de agua entre 20 y 35mm en toda la campaña de cultivo de maíz, evitando el estrés hídrico del mismo.

Como anotación cabe destacar que en el año 2012, debido a restricciones en el uso del agua de riego por parte de la Confederación Hidrográfica del Duero, la campaña finalizó el 5 de septiembre de 2012, por lo que las capas superficiales del suelo se secaron, en la Figura 26C se observa que no hay movimiento de agua. Sin embargo, en 2013 no existieron tales restricciones y además septiembre fue un mes muy lluvioso, con 73mm de agua en comparación a los 21mm de 2012, lo que se hizo que se produjera una recarga del perfil durante ese tiempo.

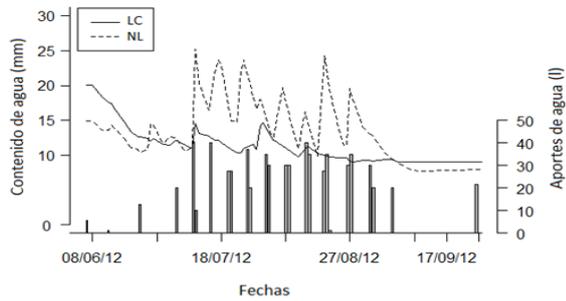
Los horizontes profundos presentaron un comportamiento similar a la capa 70-80cm representada en la Figura 26C y 26c, en este caso se comprobó que el sistema de NL mantuvo un mayor contenido volumétrico de agua a lo largo de toda la campaña de riego que las de LC, si bien es cierto, a medida que se profundizó en el perfil, el movimiento del agua fue menor a los aportes de agua de riego y no se observaron grandes aumentos de humedad volumétrica como en las capas superficiales.

ESTUDIO DEL RÉGIMEN HÍDRICO EN EL SUELO
BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE LABOREO EN MAÍZ

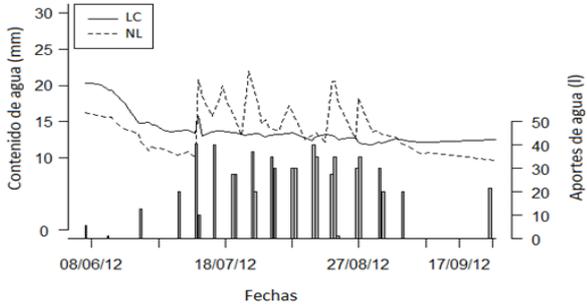
A DINÁMICA DEL AGUA DE RIEGO EN EL HORIZONTE 10-20 cm EN EL AÑO 2012



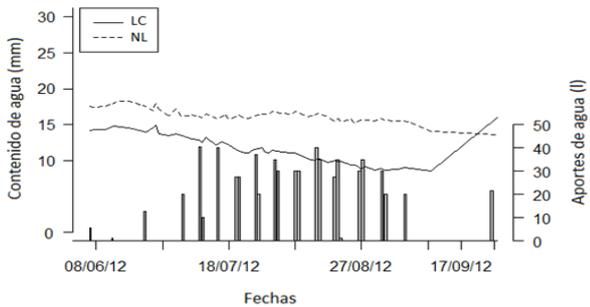
B DINÁMICA DEL AGUA DE RIEGO EN EL HORIZONTE 20-30 cm EN EL AÑO 2012



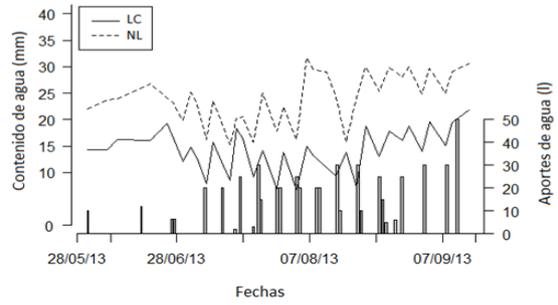
C DINÁMICA DEL AGUA DE RIEGO EN EL HORIZONTE 30-40 cm EN EL AÑO 2012



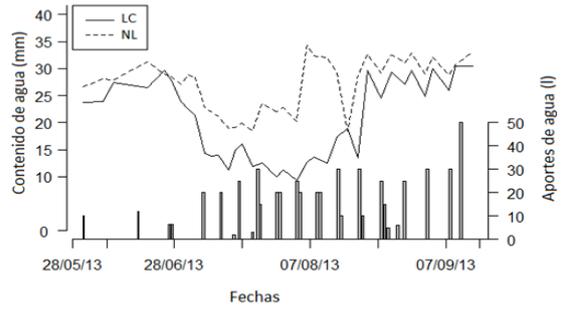
D DINÁMICA DEL AGUA DE RIEGO EN EL HORIZONTE 70-80 cm EN EL AÑO 2012



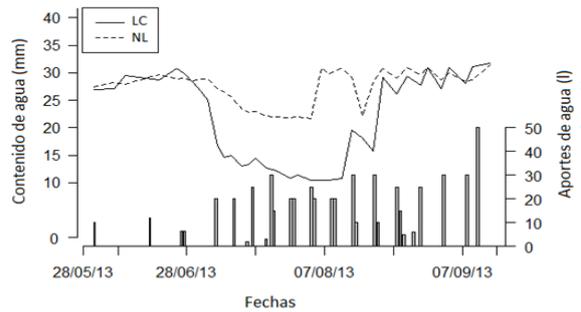
a DINÁMICA DEL AGUA DE RIEGO EN EL HORIZONTE 10-20 cm EN EL AÑO 2013



b DINÁMICA DEL AGUA DE RIEGO EN EL HORIZONTE 20-30 cm EN EL AÑO 2013



c DINÁMICA DEL AGUA DE RIEGO EN EL HORIZONTE 30-40 cm EN EL AÑO 2013



d DINÁMICA DEL AGUA DE RIEGO EN EL HORIZONTE 70-80 cm EN EL AÑO 2013

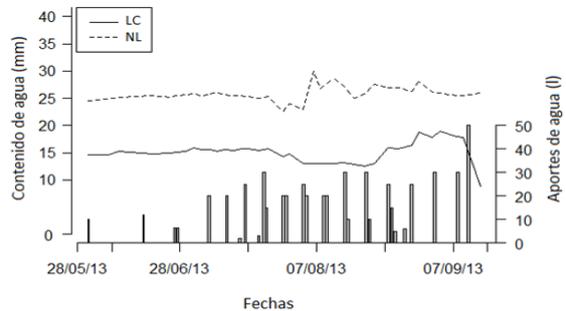


Figura 26. Aportes y contenido de agua en los horizontes del suelo 10-20cm, 20-30cm, 30-40cm y 70-80cm de profundidad a lo largo de las campañas 2012 y 2013 en ambos sistemas de laboreo. LC, laboreo convencional, NL, no laboreo.

El sistema de laboreo mostró diferencias significativas en cuanto a la evolución temporal de la dinámica del contenido de agua en el suelo ($P < 0.05$). En el caso del NL, el contenido volumétrico de agua se mantuvo constante a partir de 70cm en 2012 y 90cm en 2013, durante toda la campaña de riego. Por el contrario, el LC mostró una descarga del perfil hasta los 130 y 110cm en 2012 y 2013 respectivamente, provocando una pérdida importante del agua de riego. Este hecho también pudo hacer que el LC propiciara un mayor desarrollo radicular en el maíz, para facilitar la absorción de agua (Busari, 2015).

En cuanto al análisis temporal de la dinámica del agua en el suelo cabe destacar el aumento del contenido de agua en 2013 respecto a 2012. En en ambos años se produjo, en septiembre, un descenso en el contenido de agua en los primeros 120 y 70cm en los sistemas de LC y NL respectivamente, lo que demostró que el perfil del suelo en las parcelas de NL se secaron en un rango de profundidades menor al de las de LC. Estos resultados coincidieron con los obtenidos por (Blevins et al., 1993; Jones et al., 1994; Law, 2002; Alvarez y Steinbach, 2009) que concluyeron que el sistema de NL fue capaz de retener el agua en el suelo en el primer metro de profundidad en periodos secos, sin embargo en el de LC se perdió humedad en un rango de profundidades superior al de NL. Además, Busari (2015) determinó que la infiltración del agua en el perfil del suelo fue un 5% más lento en NL que en LC.

El factor sistema de laboreo influyó de forma significativa en la dinámica del agua en el perfil del suelo tras el riego. Las Figuras 27, 28, 29 y 30 muestran el contenido de humedad volumétrica un día después de haber regado en los dos sistemas de laboreo, LC y NL en las campañas 2012 y 2013. El rango de profundidades medidas fue entre 10cm y 150cm. En ambos años de estudio el sistema de LC mantuvo un contenido de agua cercano al punto de marchitez durante la formación de la mazorca. En la campaña 2013 la cantidad de agua fue significativamente superior a la de 2012. En el caso de las parcelas de NL, el contenido de agua en esta época se incrementó en una media del 15%, manteniéndose entre la capacidad de campo y el punto de marchitez desde mayo hasta septiembre. Este resultado demostró que la agricultura de conservación, concretamente el no laboreo, redujo las necesidades de riego y el estrés hídrico en estados fenológicos con máximas necesidades. Esto se debió a la diferente dinámica del agua en el perfil del suelo consecuencia del no laboreo del terreno (Pryor, 2006; Singh et al., 2011; Gathala et al., 2015). Estos resultados están en consonancia con los obtenidos por Bertol (2014) en un estudio de 10 años en un cultivo de maíz, llevado a cabo en Brasil, donde el sistema de NL mejoró su capacidad de retención de agua. Además se redujeron las pérdidas de agua y nutrientes por lixiviación, escorrentía y erosión a partir del quinto año tras implantar el no laboreo.

DINÁMICA TEMPORAL DEL AGUA DE RIEGO EN EL PERFIL DEL SUELO
LABOREO CONVENCIONAL. AÑO 2012

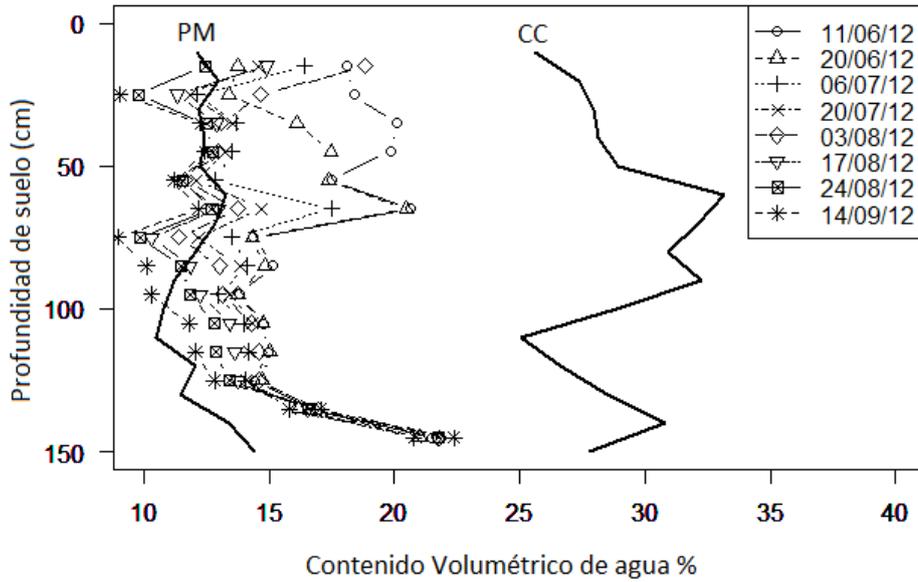


Figura 27. Dinámica temporal del agua aportada al suelo un día después del evento de riego en laboreo convencional, en la campaña 2012. PM, punto de marchitamiento y CC, capacidad de campo.

DINÁMICA TEMPORAL DEL AGUA DE RIEGO EN EL PERFIL DEL SUELO
NO LABOREO. AÑO 2012

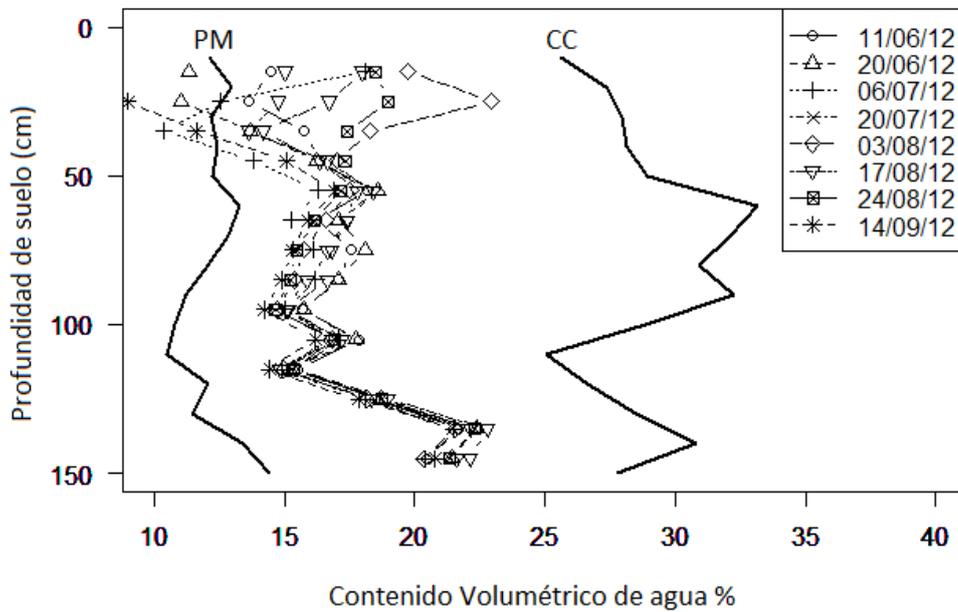


Figura 28. Dinámica temporal del agua aportada al suelo un día después del evento de riego en no laboreo, en la campaña 2012. PM, punto de marchitamiento y CC, capacidad de campo.

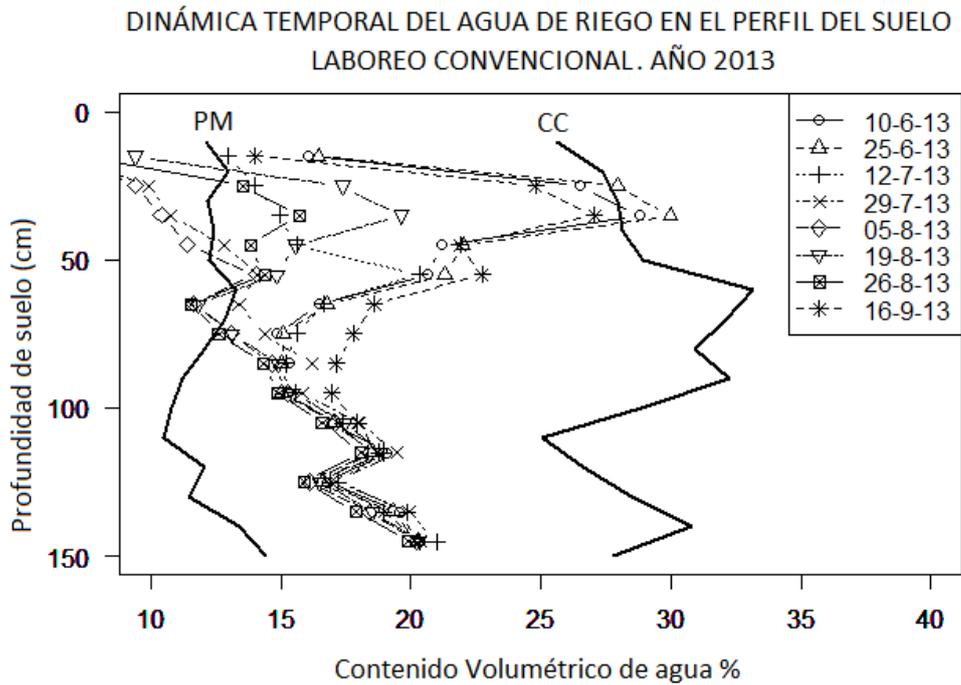


Figura 29. Dinámica temporal del agua aportada al suelo un día después del evento de riego en laboreo convencional, en la campaña 2013. PM, punto de marchitamiento y CC, capacidad de campo.

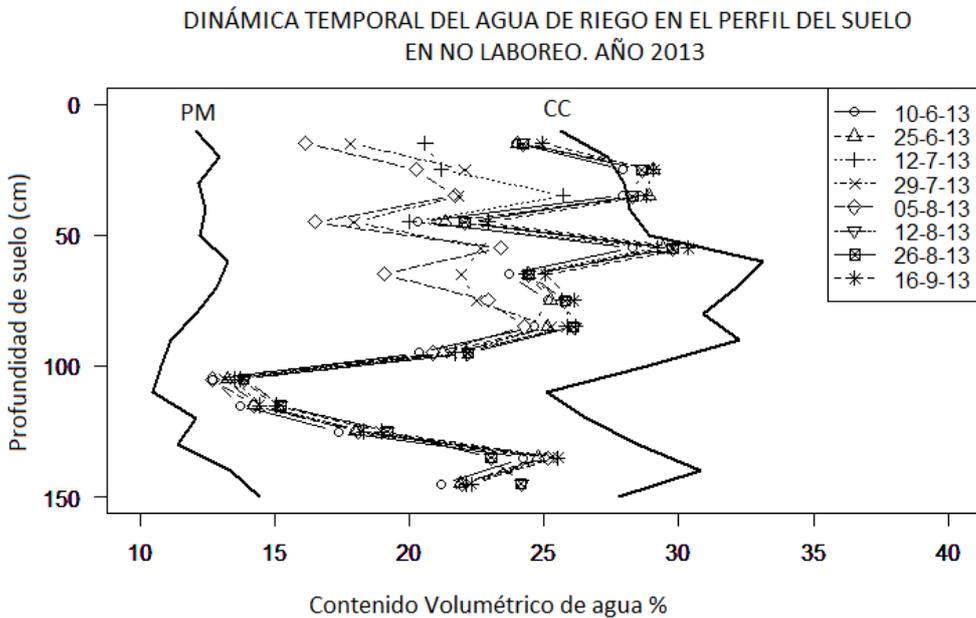


Figura 30. Dinámica temporal del agua aportada al suelo un día después del evento de riego en no laboreo, en la campaña 2013. PM, punto de marchitamiento y CC, capacidad de campo.

En las Figuras 31 y 32 se representa el comportamiento de las distintas profundidades del perfil del suelo a los aportes temporales de agua de riego, de este modo se permite comparar fácilmente cada una de las profundidades durante 2012 y 2013 por sistema

de laboreo, en este caso se observaron aumentos en el contenido de humedad de los horizontes superficiales, hasta los 80cm, a partir de esta profundidad el suelo mostró tener menos aportes de agua, ya que el contenido de la misma se mantuvo constante tras el riego. Sí se observó una tendencia en el comportamiento del agua a largo plazo, donde se pudo observar aumentos o disminuciones en el contenido de humedad en el perfil del suelo. En el caso del sistema de LC se observó una pérdida general de humedad desde el inicio de la floración hasta el llenado del grano (del 20 de julio al 05 de septiembre). Este descenso del contenido de humedad fue mayor en la profundidad comprendida entre 10cm y 40cm. En contraposición, en el sistema de NL estas profundidades no sufrieron una pérdida de agua prolongada en el tiempo y los riegos semanales fueron suficientes para no descargar el perfil en periodos críticos. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Kovar (1992) en un estudio de los efectos del sistema de laboreo en maíz de regadío a largo plazo, donde se concluyó que el NL retuvo mayor cantidad de agua en el horizonte del suelo comprendido entre 0-30cm. Miriti (2012) y Klocke (2013) en estudios a largo plazo sobre la dinámica del agua en el suelo en distintos sistemas de laboreo, en EEUU y Kenia, respectivamente, también concluyeron que la conservación de agua en los horizontes del suelo fue mayor en NL.

COMPORTAMIENTO DE LOS HORIZONTES DEL SUELO FRENTE AL RIEGO. LABOREO CONVENCIONAL

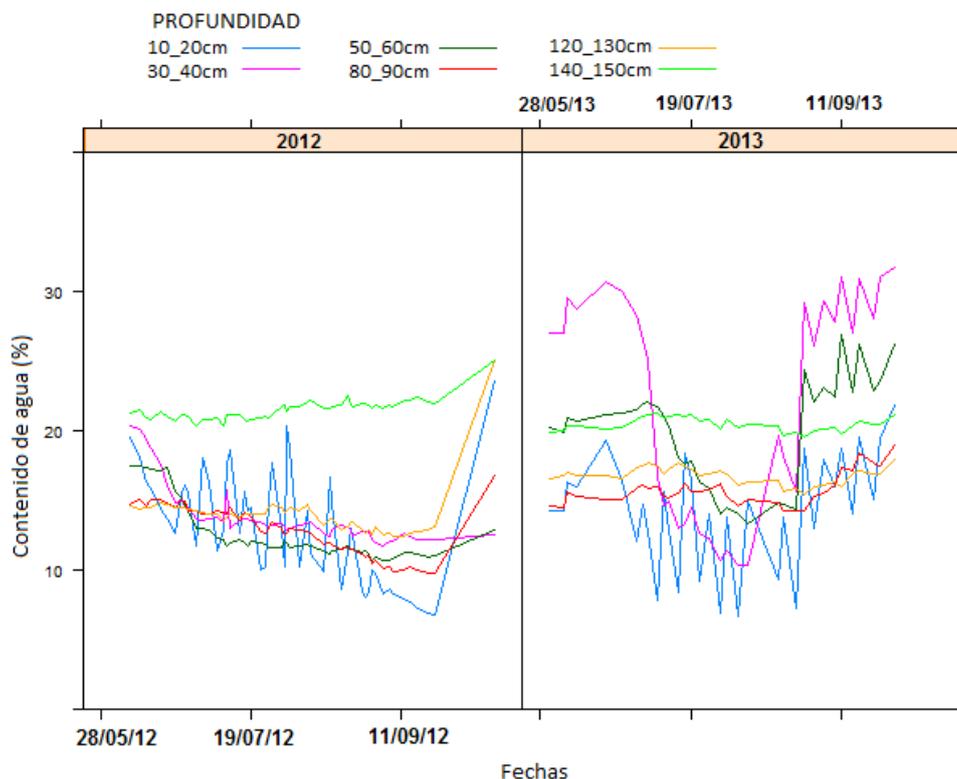


Figura 31. Comportamiento de cada horizonte del suelo frente a los aportes de agua de riego en laboreo convencional, durante las campañas 2012 y 2013.

cantidad de biomasa vegetal durante el desarrollo del cultivo. La humedad de la biomasa fue superior en NL, aunque estas diferencias entre sistemas de laboreo no fueron significativas, como tampoco lo fue el efecto del sistema de laboreo sobre el índice de cosecha (relación entre el rendimiento del cultivo y la biomasa vegetal).

Los resultados de la cosecha mecánica (Tabla VIII) mostraron que el rendimiento del cultivo de maíz se vio influido, por el factor sistema de laboreo ($P < 0.05$) en la campaña 2013, donde el sistema de NL presentó un rendimiento superior al de LC. En 2012 no se observaron diferencias significativas. El aumento del rendimiento de maíz en NL se pudo deber al mantenimiento y mejora de la estructura edáfica, que permitió retener la humedad en el suelo durante más tiempo que el LC, hecho que permite un mejor desarrollo de la planta y llenado del grano, traduciéndose en una mayor producción. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Hussain (1999); Brito Melo (2011); Vieira (2013) y Thierfelder (2015) los cuales ensayaron los sistemas de no laboreo y mínimo laboreo en maíz, obteniendo rendimientos de grano favorables en los sistemas conservacionistas en comparación con el convencional. Sin embargo, los resultados de este estudio no coinciden con los publicados por otros autores como Sheu (1991); en China y Al-kaisi (2004), en un estudio de 20 años en seis localidades en Iowa, EEUU; los cuales observaron que el sistema de NL obtuvo un rendimiento en grano inferior al de LC, si bien es cierto, estos autores concretaron que la productividad económica final del cultivo fue mayor en NL, debido al ahorro de costes y tiempo. Otros autores como Obalum (2011) concluyeron que el sistema de laboreo no afectó de forma significativa a la producción de maíz.

Tabla VIII. Biomasa vegetal, humedad de la biomasa e índice de cosecha determinado en laboreo convencional y no laboreo en las campañas 2012 y 2013. LC, laboreo convencional y NL, no laboreo.

Año	Parámetro	Sistema de Laboreo	
		LC	NL
2012	Biomasa Veg 14% (kg/ha)	41033 b	47033 a
	Hdad Biomasa (%)	28.40	32.20
	Índ Cosecha	0.37	0.32
2013	Biomasa Veg 14% (kg/ha)	28342 b	33722 a
	Hdad Biomasa (%)	39.34	42.96
	Índ Cosecha	0.37	0.36

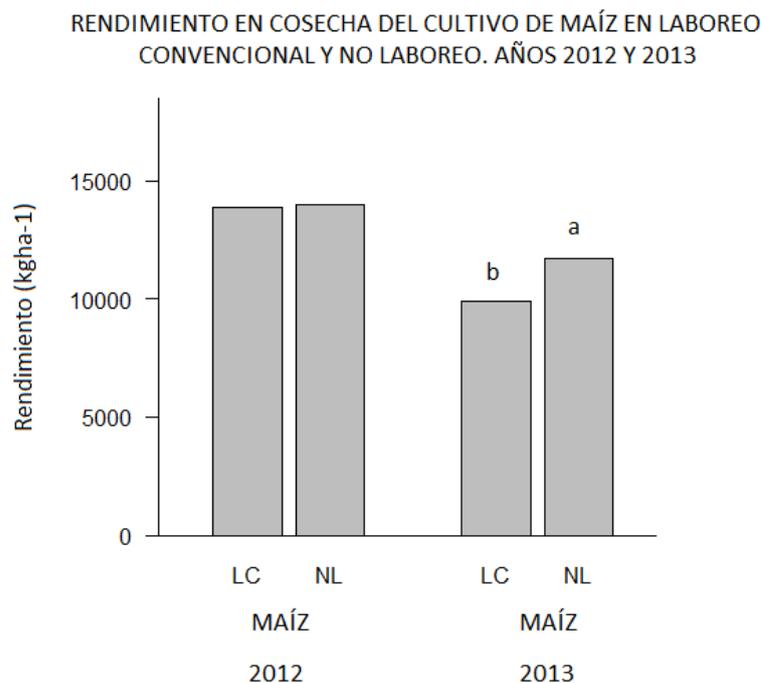


Figura 33. Rendimiento del cultivo de maíz en la cosecha mecánica en laboreo convencional y no laboreo en las campañas 2012 y 2013. LC, laboreo convencional y NL, no laboreo.

5. CONCLUSIONES

El sistema de laboreo afectó de forma significativa al comportamiento de la humedad en el perfil del suelo. El sistema de NL almacenó una mayor cantidad de agua en los distintos horizontes del suelo que el de LC y además la mantuvo temporalmente, optimizando su uso por el maíz y evitando pérdidas de nutrientes por lixiviación.

El sistema de NL mantuvo una humedad estable entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento en periodos de máximas necesidades, evitando el estrés hídrico. Por el contrario, el sistema de LC sufrió una descarga hídrica del perfil del suelo en estos periodos de máximas exigencias del cultivo en agua.

El sistema de NL mejoró la estructura del suelo, de esta forma fue capaz de almacenar el agua de riego de forma temporalmente más eficiente que el de LC. Además el sistema conservacionista mantiene los restos de cosecha del cultivo precedente sobre la superficie del suelo, actuando como una capa aislante que evitó la evapotranspiración del agua y la pérdida de nutrientes por erosión. Además, la capa formada por los restos de cosecha hizo que el suelo mantuviera una temperatura menor en las parcelas de NL que en las de LC durante el verano, y así se evitó la evaporación del agua.

En los dos años de estudio las parcelas de NL tuvieron mayor biomasa vegetal que las de LC.

En cuanto a la producción, los resultados no fueron concluyentes, pues mientras que en el primer año no hubo diferencias entre sistemas de laboreo, en el segundo el sistema de NL obtuvo un mayor rendimiento de grano que el de LC. Futuros estudios serán necesarios para obtener resultados más sólidos y concluyentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Kaisi, M., & Licht, M. A. (2004). Effect of strip tillage on corn nitrogen uptake and residual soil nitrate accumulation compared with no-tillage and chisel plow. *Agronomy Journal*, 96(4), 1164-1171.
- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Wright, J. L., Howell, T. A., Ventura, F., Snyder, R., et al. (2006). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETO by the FAO56 penman-monteith method. *Agricultural Water Management*, 81(1-2), 1-22.
- Alvarez, R., & Steinbach, H. S. (2009). A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the argentine pampas. *Soil and Tillage Research*, 104(1), 1-15.
- Andrade, F. H., Otegui, M. E., & Vega, C. (2000). Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize. *Agronomy Journal*, 92(1), 92-97.
- Bastida, F., Moreno, J. L., Hernandez, T., & Garcia, C. (2007). The long-term effects of the management of a forest soil on its carbon content, microbial biomass and activity under a semi-arid climate. *Applied Soil Ecology*, 37(1-2), 53-62.
- Bergamaschi, H., Dalmago, G. A., Bergonci, J. I., Menegassi Bianchi Krueger, C. A., Machado Heckler, B. M., & Comiran, F. (2010). Intercepted solar radiation by maize crops subjected to different tillage systems and water availability levels. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 45(12), 1331-1341.
- Bertol, I., Barbosa, F. T., Mafra, A. L., & Flores, M. C. (2014). Soil water erosion under different cultivation systems and different fertilization rates and forms over 10 years. *Revista Brasileira De Ciencia do Solo*, 38(6), 1918-1928.
- Blanco-Canqui, H., Ferguson, R. B., Jin, V. L., Schmer, M. R., Wienhold, B. J., & Tatarko, J. (2014). Can cover crop and manure maintain soil properties after stover removal from irrigated no-till corn? *Soil Science Society of America Journal*, 78(4), 1368-1377.
- Blevins, R. L., & Frye, W. W. (1993). Conservation tillage: An ecological approach to soil management. *Advances in Agronomy*, 51(0), 33-78.
- Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A. C., Soriano-Soto, M. D., & Tiemessen, I. R. (1999). Spatial and short-term temporal variations in runoff, soil aggregation and other soil properties along a mediterranean climatological gradient (vol 33, pg 123, 1998). *Catena*, 34(3-4), 387-387.

- Brito, A. d. S., Libardi, P. L., Anunciato Mota, J. C., & Moraes, S. O. (2011). Field capacity estimation based on retention curve and soil water flux density. *Revista Brasileira De Ciencia do Solo*, 35(6), 1939-1948.
- Bruinsma, M., Kowalchuk, G. A., & van Veen, J. A. (2003). Effects of genetically modified plants on microbial communities and processes in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 37(6), 329-337.
- Bueno, B. D., deLima, D. C., Teixeira, S. H. C., & Minette, E. (1997). In Almeida M. (Ed.), *The mechanical response of reinforced soils using short randoml distributed plastic strips*
- Buerkert, A., Nagieb, M., Siebert, S., Khan, I., & Al-Maskri, A. (2005). Nutrient cycling and field-based partial nutrient balances in two mountain oases of oman. *Field Crops Research*, 94(2-3), 149-164.
- Busari, M. A., & Salako, F. K. (2015). Soil hydraulic properties and maize root growth after application of poultry manure under different tillage systems in abeokuta, southwestern nigeria. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(2), 223-237.
- Calera Belmonte, A., Jochum, P., Cuesta, A., Montoro, A., & López Fuster, P. (2005). Irrigacion management from space: Towards user-friendly products. *Irrigation and Drainage systems*, 19(1), 337-354.
- Calvino, P. A., Andrade, F. H., & Sadras, V. O. (2003). Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agronomy Journal*, 95(2), 275-281.
- Cannell, R. Q., & Hawes, J. D. (1994). Trends in tillage practices in relation to sustainable crop production with special reference to temperate climates. *Soil & Tillage Research*, 30(2-4), 245-282.
- Cerda, A., Imeson, A. C., & Calvo, A. (1995). Fire and aspect induced differences on the erodibility and hydrology of soils at la-costera, valencia, southeast spain. *Catena*, 24(4), 289-304.
- Corsini, P. C., & Ferraudo, A. S. (1999). Effects of tillage systems on bulk density, aeration porosity and root development of corn in a typic haplorthox soil. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 34(2), 289-298.
- Corns, I. G. W. (1987). Compaction by forestry equipment and effects on coniferous

- seedling growth on four soils in the Alberta foothills. *Canadian Journal of Forest Research*, 18(0), 75-84.
- Cresswell HP & Hamilton. (2002). Particle Size Analysis. *Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation*. (Eds. NJ McKenzie, HP Cresswell and KJ Coughlan) CSIRO Publishing: Collingwood, Victoria, 224-239.
- Crovetto C. (2006). No Tillage: The Relationship between No Tillage, *Crop Residues, Plants and Soil Nutrition*. Hualpen, Chile: Trama Impresores, 216.
- da Silveira, P. M., Stone, L. F., Alves Junior, J., & da Silva, J. G. (2008). Effects of soil tillage and crop rotation systems on bulk density and soil porosity of a dystrophic red latosol. *Bioscience Journal*, 24(3), 53-U1.
- Dağdelen, N., Yılmaz, E., Sezgin, F., & Gürbüz, T. (2006). Water-yield relation and water use efficiency of cotton (*gossypium hirsutum* L.) and second crop corn (*zea mays* L.) in western turkey. *Agricultural Water Management*, 82(1-2), 63-85.
- Das, A., Ghosh, P. K., Verma, M. R., Munda, G. C., Ngachan, S. V., & Mandal, D. (2015). Tillage and residue mulching effect on productivity of maize (*zea mays*)-toria (*brassica campestris*) cropping system in fragile ecosystem. *Experimental Agriculture*, 51(1), 107-125.
- De Bona, F. D., Bayer, C., Bergamaschi, H., & Dieckow, J. (2006). Soil organic carbon in sprinkler irrigation systems under no-till and conventional tillage. *Revista Brasileira De Ciencia do Solo*, 30(5), 911-919.
- De Rosnay, P., Calvet, J.-C., Kerr, Y., Wigneron, J.-P., Lemaître, F., Escorihuela, M., et al. (2006). A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing. *Remote Sensing of Environmen,t* 102, 377-389.
- De Vita, P., Di Paolo, E., Fecondo, G., Di Fonzo, N., & Pisante, M. (2007). No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern italy. *Soil and Tillage Research*, 92(1-2), 69-78.
- Dick, W. A., Edwards, W. M., Stehouwer, R. C., & Eckert, D. J. (1992). Maize yield and nitrogen uptake after established no-tillage fields are plowed. *Soil & Tillage Research*, 24(1), 1-10.
- Dorman, M., Svoray, T., Perevolotsky, A., & Sarris, D. (2013). Forest performance during two consecutive drought periods: Diverging long-term trends and shortterm responses along a climatic gradient. *Forest Ecology and Management*, 310(0), 1-9.

- Eagleson, P. S. (1982). Ecological optimality in water-limited natural soil-vegetation systems .1. theory and hypothesis. *Water Resources Research*, 18(2), 325-340.
- FAO. (1974). Soil Survey Irrigation Investigations. Soil Bulletin (draft). *Land and Water Development Division. FAO Rome*. 207.
- FAO. (2013). FAO statistical year book 2013.
- Foroud, N., Hobbs, E. H., Riewe, R., & Entz, T. (1992). Field verification of a microcomputer irrigation model. *Agricultural Water Management*, 21(3), 215-234.
- Franchini, J. C., Crispino, C. C., Souza, R. A., Torres, E., & Hungria, M. (2007). Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern brazil. *Soil & Tillage Research*, 92(1-2), 18-29.
- Franzluebbers, A. J., Hons, F. M., & Zuberer, D. A. (1995). Tillage and crop effects on seasonal dynamics of soil Co2 evolution, water-content, temperature, and bulk-density. *Applied Soil Ecology*, 2(2), 95-109.
- Galantini, J., & Rosell, R. (2006). Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid pampean soils. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 72-79.
- Garcia-Orenes, F., Cerda, A., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Bodi, M. B., Arcenegui, V., et al. (2009). Effects of agricultural management on surface soil properties and soil-water losses in eastern spain. *Soil & Tillage Research*, 106(1), 117-123.
- Garrido, F., Serrano, S., Campbell, C. G., Barrios, L., & Garcia-Gonzalez, A. T. (2008). Evidence of physical and chemical nonequilibrium in lead and cadmium transport and sorption in acid soils. *Soil Science Society of America Journal*, 72(5), 1434-1444.
- Gathala, M. K., Timsina, J., Islam, M. S., Rahman, M. M., Hossain, M. I., Harun-Ar-Rashid, M., et al. (2015). Conservation agriculture based tillage and crop establishment options can maintain farmers' yields and increase profits in south asia's rice-maize systems: Evidence from bangladesh. *Field Crops Research*, 172, 85-98.

- Groves, S. J., & Rose, S. C. (2004). Calibration equations for divinex 2000 capacitance measurements of volumetric soil water content of six soils. *Soil use and Management*, 20(1), 96-97.
- Gruber, S., Moehring, J., & Claupein, W. (2011). On the way towards conservation tillage-soil moisture and mineral nitrogen in a long-term field experiment in Germany. *Soil & Tillage Research*, 115, 80-87.
- Harvey, W. J., Grant, D. G., & Lammerink, J. P. (1997). Physical and sensory changes during the development and storage of buttercup squash. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 25(4), 341-351.
- Hussain, I., Olson, K. R., & Ebelhar, S. A. (1999). Long-term tillage effects on soil chemical properties and organic matter fractions. *Soil Science Society of America Journal*, 63(5), 1335-1341.
- Irmak, S., Haman, D. Z., & Bastug, R. (2000). Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal*, 92(6), 1221-1227.
- Ji, Q., Sun, H., Taraqqi, A. K., & Wang, X. (2014). [Impact of different tillage practices on soil organic carbon and water use efficiency under continuous wheatmaize binary cropping system]. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao = the Journal of Applied Ecology / Zhongguo Sheng Tai Xue Xue Hui, Zhongguo Ke Xue Yuan Shenyang Ying Yong Sheng Tai Yan Jiu Suo Zhu Ban*, 25(4), 1029-35.
- Jones, O. R., Hauser, V. L., & Popham, T. W. (1994). No-tillage effects on infiltration, runoff, and water conservation on dryland. *Transactions of the ASAE*, 37(2), 473-479.
- Kenney, I., Blanco-Canqui, H., Presley, D. R., Rice, C. W., Janssen, K., & Olson, B. (2015). Soil and crop response to stover removal from rainfed and irrigated corn. *Global Change Biology Bioenergy*, 7(2), 219-230.
- Klocke, N. L., Currie, R. S., & Aiken, R. M. (2009). Soil water evaporation and crop residues. *Transactions of the ASABE*, 52(1), 103-110.
- Kovar, J. L., Barber, S. A., Kladvik, E. J., & Griffith, D. R. (1992). Characterization of soil-temperature, water-content, and maize root distribution in 2 tillage systems. *Soil & Tillage Research*, 24(1), 11-27.

- Lamm, F., Aiken, R., & Abou Kheira, A. (2009). Corn yield and water use characteristics as affected by tillage, plant density and irrigation. *Transactions of the ASABE*, 52 (1), 133-143.
- Law, B. E., Falge, E., Gu, L., Baldocchi, D. D., Bakwin, P., Berbigier, P., et al. (2002). Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1-4), 97-120.
- Lecina, S., Martinez-Cob, A., Perez, P. J., Villalobos, F. J., & Baselga, J. J. (2003). Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the penman-monteith equation under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 60(3), 181-198.
- Liu, L., Maier, A., Klocke, N., Yan, S., Rogers, D., Tesso, T., et al. (2013). Impact of deficit irrigation on sorghum physical and chemical properties and ethanol yield. *Transactions of the ASABE*, 56(4), 1541-1549.
- López-Fando, C., Dorado, J., & Pardo, M. T. (2007). Effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil properties and crop yields in a semi-arid soil from central Spain. *Soil and Tillage Research*, 95(1-2), 266-276.
- López Fuster, P., & Montoro Rodríguez, A. (2005). Los regadíos en España. El ahorro de agua, recurso del futuro. *Agua y Agronomía*, 15(1), 583-602.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). Anuario de Estadística 2014.
- Malhi, S. S., Grant, C. A., Johnston, A. M., & Gill, K. S. (2001). Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: A review. *Soil and Tillage Research*, 60(3-4), 101-122.
- Martellotto, E., Salas, P., Lovera, E., Salinas, A., & Manzini, P. (1999). Módulo de capacitación, experimentación y transferencia de tecnología en riego suplementario. *Proyecto de intensificación de granos. INTA Manfredi. Córdoba*, 4-13.
- Martins, V., Miranda, A. I., Carvalho, A., Schaap, M., Borrego, C., & Sá, E. (2012). Impact of forest fires on particulate matter and ozone levels during the 2003, 2004 and 2005 fire seasons in Portugal. *Science of the Total Environment*, 414(0), 53-62.

- Mati, R., & Kotorova, D. (2007). The effect of soil tillage system on soil bulk density and other physical and hydrophysical characteristics of gleyic fluvisol. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 55(4), 246-252.
- Mickelson, S. K., Boyd, P., Baker, J. L., & Ahmed, S. I. (2001). Tillage and herbicide incorporation effects on residue cover, runoff, erosion, and herbicide loss. *Soil & Tillage Research*, 60(1-2), 55-66.
- Micucci F., Álvarez C. (2002). El agua en los sistemas extensivos. Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua. INPOFOS. Archivo Agronómico 8, 1-4.
- Mielke, L. N., Powers, W. L., Badri, S., & Jones, A. J. (1994). Estimating soil water content from soil strength. *Soil and Tillage Research*, 31(2-3), 199-209.
- Miriti, J. M., Kironchi, G., Esilaba, A. O., Heng, L. K., Gachene, C. K. K., & Mwangi, D. M. (2012). Yield and water use efficiencies of maize and cowpea as affected by tillage and cropping systems in semi-arid eastern kenya. *Agricultural Water Management*, 115, 148-155.
- Monteith J.L. (1981). Evaporation and surface temperature. *Quarterly J. Royal Meteo Soc*, 107(0), 1-27.
- Montero, J., Martinez, A., Valiente, M., Moreno, M. A., & Tarjuelo, J. M. (2013). Analysis of water application costs with a centre pivot system for irrigation of crops in Spain. *Irrigation Science*, 31(3), 507-521.
- Moreno, F., Cabrera, F., Murillo, J. M., Fernandez, J. E., FernandezBoy, E., & Cayuela, J. A. (1996). Nitrate leaching under irrigated agriculture. *Sustainability of Irrigated Agriculture*, 312, 407-415.
- Moreno, F., Cayuela, J. A., Fernandez, J. E., Fernandez Boy, E., Murillo, J. M., & Cabrera, F. (1996). Water balance and nitrate leaching in an irrigated maize crop in SW Spain. *Agricultural Water Management*, 32(1), 71-83.
- Moreno, F., Pelegrín, F., Fernández, J.E., & Murillo, J. M. (1997). Soil physical properties, water depletion and crop development under traditional and conservation tillage in southern Spain. *Soil Till*, 41(0), 25-42.
- Moreno-Pérez, M. F., & Roldán-Cañas, J. (2013). Assessment of irrigation water management in the genil-cabra (córdoba, Spain) irrigation district using irrigation indicators. *Agricultural Water Management*, 120(0), 98-106.

- Munodawafa, A., & Zhou, N. (2008). Improving water utilization in maize production through conservation tillage systems in semi-arid zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33(8-13), 757-761.
- Munoz, A., Lopez-Pineiro, A., & Ramirez, M. (2007). Soil quality attributes of conservation management regimes in a semi-arid region of south western spain. *Soil & Tillage Research*, 95(1-2), 255-265.
- Munoz-Carpena, R., Ritter, A., & Li, Y. C. (2005). Dynamic factor analysis of groundwater quality trends in an agricultural area adjacent to everglades national park. *Journal of Contaminant Hydrology*, 80(1-2), 49-70.
- Mupangwa, W., & Jewitt, G. P. W. (2011). Simulating the impact of no-till systems on field water fluxes and maize productivity under semi-arid conditions. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(14-15), 1004-1011.
- Nakamoto, T., & Suzuki, K. (2001). Influence of soybean and maize roots on the seasonal change in soil aggregate size and stability. *Plant Production Science*, 4(4), 317-319.
- Norwood, C. A. (1999). Water use and yield of dryland row crops as affected by tillage. *Agronomy Journal*, 91(1), 108-115.
- Obalum, S. E., Amalu, U. C., Obi, M. E., & Wakatsuki, T. (2011). Soil water balance and grain yield of sorghum under no-till versus conventional tillage with surface mulch in the derived savanna zone of southeastern nigeria. *Experimental Agriculture*, 47(1), 89-109.
- Ozpinar, S., & Ozpinar, A. (2015). Tillage effects on soil properties and maize productivity in western turkey. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(7), 1029-1040.
- Paltineanu, I.C. & Starr, J.L. (1997). Real-time soil water dynamics using multisensory capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Science Society of America Journal*, 61(0), 1576-1585.
- Petry, M. T., Zimmermann, F. L., Carlesso, R., Michelon, C. J., & Kunz, J. H. (2007). Water availability to maize plants cultivated under no-tillage and conventional tillage systems. *Revista Brasileira De Ciencia do Solo*, 31(3), 531-539.

- Picking, D. J., & Veneman, P. L. M. (2004). Vegetation patterns in a calcareous sloping fen of southwestern Massachusetts, USA. *Wetlands*, 24(3), 514-528.
- Piñeiro, J., Pérez, M. (2000). Direct drilling of forage maize, sorghum×Sudangrass and Italian ryegrass. *Grassland Science in Europe*, 5,131-133.
- Pittelkow, C. M., Liang, X., Linquist, B. A., van Groenigen, K. J., Lee, J., Lundy, M. E., et al. (2015). Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 517(7534), 365-U482.
- Pittock, J., & Holland, R. (2004). Strategies to manage stream flow to benefit people and nature: A non-government conservation organisation's perspective. *Water Science and Technology*, 49(7), 89-95.
- Porta, J., López-Acevedo, M. & Roquero, C. (1999). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Potter, K. N., Torbert, H. A., & Morrison, J. E. (1995). Tillage and residue effects on infiltration and sediment losses on vertisols. *Transactions of the ASAE*, 38(5), 1413-1419.
- Pryor R. (2006). Switching to No-Till Can Save Irrigation Water. Univ Nebraska-Lincoln Ext Pub EC, 196-3.
- Puiatti, J. M. P., Crespi, R. J., & Rivetti, A. R. (2002). Riego con equipos presurizados. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo*. 34(2), 27-33.
- Reicosky, D. C., Kemper, W. D., Langdale, G. W., Douglas, C. L., & Rasmussen, P. E. (1995). Soil organic-matter changes resulting from tillage and biomass production. *Journal of Soil and Water Conservation*, 50(3), 253-261.
- Richards, L.A. (1947). Pressure membrane apparatus: construction and use. *Agric. Eng*, 28 (1), 451-454.
- Rivetti, A., Puiatti, J. M. P., Morábito, J. A. & Garello, A. N. (2001). Riego complementario del maíz en la zona semiárida Argentina en el marco de una agricultura sustentable. *Seminario Nacional "Manejo sustentable del recurso hídrico en zonas áridas"*. Mendoza. Argentina, 107.

- Rodríguez, J.A., Camacho, E., & Blanco, M. (2011). Evaluation of water and energy use in pressurized irrigation networks in Southern Spain. *J Irrig Drain Eng.* doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774. 0000338.
- Roldan, A., Caravaca, F., Hernandez, M. T., Garcia, C., Sanchez-Brito, C., Velasquez, M., et al. (2003). No-tillage, crop residue additions, and legume cover cropping effects on soil quality characteristics under maize in patzcuaro watershed (México). *Soil & Tillage Research*, 72(1), 65-73.
- Roman, R., Caballero, R., Bustos, A., Diez, J. A., Cartagena, M. C., Vallejo, A., et al. (1996). Water and solute movement under conventional corn in central Spain .1. water balance. *Soil Science Society of America Journal*, 60(5), 1530-1536.
- Rüssel, C. (1991). Self diffusion of polyvalent ions in a soda-lime-silica glass melt. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 134(1-2), 169-175.
- Salem, H. M., Valero, C., Angel Munoz, M., & Gil-Rodriguez, M. (2015). Effect of integrated reservoir tillage for in-situ rainwater harvesting and other tillage practices on soil physical properties. *Soil & Tillage Research*, 151, 50-60.
- Sampathkumar, T., Pandian, B. J., Rangaswamy, M. V., Manickasundaram, P., & Jeyakumar, P. (2013). Influence of deficit irrigation on growth, yield and yield parameters of cotton-maize cropping sequence. *Agricultural Water Management*, 130, 90-102.
- Schwartz, R. C., Baumhardt, R. L., & Evett, S. R. (2010). Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. *Soil and Tillage Research*, 110(2), 221-229.
- Shelton, D. R., Sadeghi, A. M., & McCarty, G. W. (2000). Effect of soil water content on denitrification during cover crop decomposition. *Soil Science*, 165(4), 365-371.
- Sheu, J. F., & Chu, T. M. (1991). Effect of no-tillage on growth and yield of maize under 2 crop seasons. *Journal of the Agricultural Association of China*, (156), 7-14.
- Silva, F. A., Lopes de Freitas, F. C., Ribeiro Rocha, P. R., Xavier Cunha, J. L., Dallabona Dombroski, J. L., Holanda Coelho, M. E., et al. (2015). Growing corn for silage in no-tillage and conventional systems under different periods of hydric deficit. *Semina-Ciencias Agrarias*, 36(1), 327-340.

- Sime, G., Aune, J. B., & Mohammed, H. (2015). Agronomic and economic response of tillage and water conservation management in maize, central rift valley in ethiopia. *Soil & Tillage Research*, 148, 20-30.
- Singh, G., Kumar, D., Marwaha, T. S., Singh, A. K., & Srinivasmurthy, K. (2011). Conservation tillage and integrated nitrogen management stimulates soil microbial properties under varying water regimes in maize-wheat cropping system in northern india. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57(5), 507-521.
- Soane, B. D., Ball, B. C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., & Roger-Estrade, J. (2012). No-till in northern, western and south-western europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118(0), 66-87.
- Soil survey staff. (1987). Keys to soil taxonomy revised edition. Soil Conservation Service. Washington DC.
- Sombrero, A., & de Benito, A. (2010). Carbon accumulation in soil. ten-year study of conservation tillage and crop rotation in a semi-arid area of castile-leon, spain. *Soil & Tillage Research*, 107(2), 64-70.
- Sombrero, A., & de Benito, A. (2008). Análisis económico de sistemas de laboreo de conservación y rotaciones de cultivo en zonas semiáridas del centro-norte de España. *Tierras de Castilla y León*, 151, 94-103.
- Spedding, T. A., Hamel, C., Mehuys, G. R., & Madramootoo, C. A. (2004). Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biology & Biochemistry*, 36(3), 499-512.
- Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes, & E. Fereres. (2009). AquaCrop, The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101, 426-437.
- Strudley, M. W., Green, T. R., & Ascough II, J. C. (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research*, 99(1), 4-48.
- Thierfelder, C., Matemba-Mutasa, R., & Rusinamhodzi, L. (2015). Yield response of maize (*zea mays* L.) to conservation agriculture cropping system in southern africa. *Soil & Tillage Research*, 146, 230-242.

- Tripplett, G.B. & W.A. Dick. (2008). No-tillage crop production: A revolution in agriculture. *Agronomy Journal*, 100(0), 153-165.
- Tormena, C. A., Barbosa, M. C., Costa, A. C. S. d., & Gonçalves, A. C. A. (2002). Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia Agricola*, 59(4), 795-801.
- Unger, P. W., & Fulton, L. J. (1990). Conventional-tillage and no-tillage effects on upper root zone soil-conditions. *Soil & Tillage Research*, 16(4), 337-344.
- Unger, P. W., & Jones, O. R. (1994). Infiltration of simulated rainfall - dry aggregate size effects. *Journal of Agronomy and Crop Science-Zeitschrift Fur Acker Und Pflanzenbau*, 173(2), 100-105.
- Unger, P. W., & Musick, J. T. (1990). Ridge tillage for managing irrigation water on the U.S. southern great plains. *Soil and Tillage Research*, 18(2-3), 267-282.
- van Donk S.J., Martin D.L., & Irmak, S. (2010). Crop residue cover effects on evaporation, soil water content, and yield of deficit-irrigated corn in west-central Nebraska. *Transactions of the ASABE*, 53(6), 1787-97.
- Vanhie, M., Deen, W., Lauzon, J. D., & Hooker, D. C. (2015). Effect of increasing levels of maize (*zea mays* L.) residue on no-till soybean (*glycine max* merr.) in northern production regions: A review. *Soil & Tillage Research*, 150, 201-210.
- Vieira, S., Dechen, S., Rodrigues, K., & Hurtado, S. (2013). In Stafford J. (Ed.), *Spatial and temporal variability of soybean and maize yield after 27 years of no-tillage in sao paulo, brazil*.
- Viets Jr., F. G. (1972). Chapter 6 - water deficits and nutrient availability. In T. T. KOZLOWSKI (Ed.), *Plant responses and control of water balance* (pp. 217-239) Academic Press.
- Wang, H., Wang, X., & Tian, X. (2014). [Effect of straw-returning on the storage and distribution of different active fractions of soil organic carbon]. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao = the Journal of Applied Ecology / Zhongguo Sheng Tai Xue Xue Hui, Zhongguo Ke Xue Yuan Shenyang Ying Yong Sheng Tai Yan Jiu Suo Zhu Ban*, 25(12), 3491-8.
- Wilhelm, W. W., Liebig, M. A., Varvel, G. E., & Blackmer, T. M. (1999). Midseason stalk breakage in corn as affected by crop rotation, hybrid, and nitrogen fertilizer rate. *Agronomy Journal*, 91(1), 160-165.

- Wuest, S. B. (2001). Soil biopore estimation: Effects of tillage, nitrogen, and photographic resolution. *Soil and Tillage Research*, 62(3-4), 111-116.
- Wuest, S. B., Caesar-TonThat, T. C., Wright, S. F., & Williams, J. D. (2005). Organic matter addition, N, and residue burning effects on infiltration, biological, and physical properties of an intensively tilled silt-loam soil. *Soil and Tillage Research*, 84(2), 154-167.
- Zhang, B. C., Li, F. M., Huang, G. B., Gan, Y. T., Liu, P. H., & Cheng, Z. Y. (2005). Effects of regulated deficit irrigation on grain yield and water use efficiency of spring wheat in an arid environment. *Canadian Journal of Plant Science*, 85(4), 829-837.
- Zhang, L., Li, J., Jia, Z., Liu, B., Zhao, H., & Shang, J. (2011). [Effects of conservation tillage on soil water conservation and crop yield of winter wheatspring maize rotation field in weibe highland]. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao the Journal of Applied Ecology / Zhongguo Sheng Tai Xue Xue Hui, Zhongguo Ke Xue Yuan Shenyang Ying Yong Sheng Tai Yan Jiu Suo Zhu Ban*, 22(7), 1750-8.
- Zhuang, J., Jin, Y., & Miyazaki, T. (2001). Estimating water retention characteristic from soil particle-size distribution using a non-similar media concept. *Soil Science*, 166(5), 308-321.