



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

**INFLUENCIA DE DIFERENTES MANEJOS
AGRÍCOLAS SOBRE EL CRECIMIENTO
RADICAL Y SU RELACIÓN CON LA
AGREGACIÓN DEL SUELO**

CARLOS ALBERTO TORRES GUERRERO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2012

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

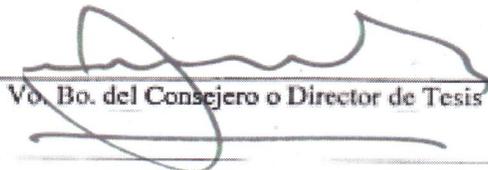
En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Carlos Alberto Torres Guerrero, Alumno de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Jorge D. Etchevers Barra, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Influencia de diferentes manejos agrícolas sobre el crecimiento radical y su relación con la agregación del suelo.

y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 10 de Noviembre de 2012



Firma



Vº. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **Influencia de diferentes manejos agrícolas sobre crecimiento radicular y su relación con la agregación del suelo**, realizada por el alumno: **Carlos Alberto Torres Guerrero** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

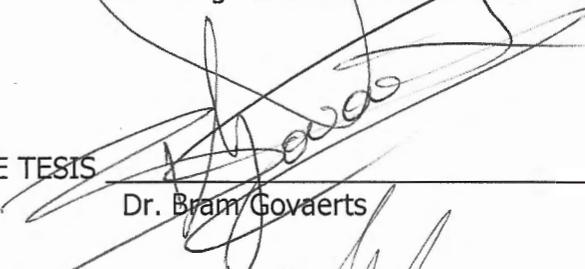
MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGIA

CONSEJO PARTICULAR

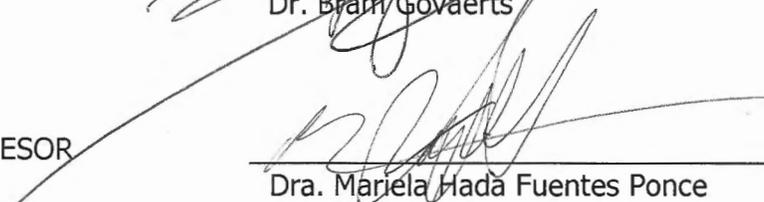
CONSEJERO


Dr. Jorge D. Etchevers Barra

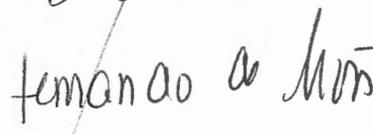
DIRECTOR DE TESIS


Dr. Bram Govaerts

ASESOR


Dra. Mariela Hada Fuentes Ponce

ASESOR


Dr. Fernando de León González

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Octubre de 2012

RESUMEN

**INFLUENCIA DE DIFERENTES MANEJOS AGRÍCOLAS SOBRE EL
CRECIMIENTO RADICAL Y SU RELACIÓN CON LA AGREGACIÓN DEL
SUELO**

Carlos Alberto Torres Guerrero, M en C.

Colegio de Postgraduados, 2012

Los suelos de México han sido degradados en los últimos años en buena parte por la acción del hombre. Debido a las prácticas agronómicas empleadas en la mayor parte del país (labranza convencional, monocultivos y remoción de residuos vegetales de cosechas anteriores) los suelos con potencial agrícola se han visto disminuidos en su productividad. La Agricultura de Conservación (AC) ofrece un aprovechamiento sustentable del recurso suelo, asegurando su estabilidad y estructura, con el propósito de aumentar los rendimientos de los cultivos. El experimento que se reporta es de larga duración. Se inició en 1991 en el Batán Texcoco, Estado de México, en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y consta de 32 parcelas con diferentes combinaciones de labranza (tradicional o cero), residuos (con o sin) y cultivos (rotación o monocultivos). El objetivo de la presente investigación fue determinar los parámetros que caracterizan el crecimiento radical de dos cereales: cebada (*Hordeum vulgare* L.) y maíz (*Zea mays* L.), y establecer la relación de éstos sistemas con la formación de agregados en un suelo, sometido a diferentes manejos agronómicos. La AC permitió el crecimiento adecuado de los sistemas radicales y la formación de agregados, mientras que en el tratamiento LZ-rMM (labranza cero, sin residuos y monocultivo de maíz) resultó ser el de menor calidad física para la formación de agregados y crecimiento de las raíces. Las raíces de cebada generaron una mejor estructura del suelo en comparación con las de maíz. La densidad radical (RLD) de la cebada, fue la que tuvo una correlación positiva con la presencia de meso y macroagregados y negativa con los microagregados, por lo que se puede sugerir el uso de este parámetro como un indicador de agregación. El área superficial (AS) y la biomasa radical (BR) pueden emplearse como indicadores de meso y macroagregación solo en cultivos de cebada. La misma correlación se localizó en la biomasa radical/aérea (BR/BA) en ambos cultivos.

Palabras clave: Labranza, Agricultura de conservación, raíces, agregación.

SUMMARY

INFLUENCE OF DIFFERENT AGRICULTURAL MANAGERMENTS ON ROOT GROWTH AND THE EFFECT OF ROOT GROWTH ON SOIL AGGREGATION

Mexico soils have been degraded in recent years largely because of human action. Due to the agronomic practices used in most of the country (conventional tillage, monocultures and removal of plant residues from previous crops) the productivity of land with agricultural potential have decreased. Conservation Agriculture (AC) offers a sustainable use of soil resources, ensuring their stability and structure in order to increase crop yields. The experiment reported is a long term trial. It began in 1991 in the Batan Texcoco, Estado de México, at the International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT) and consists of 32 plots with different combinations of tillage (conventional or zero), crop residues (with or without) and crops (rotation or monoculture). The aim of this investigation was to determine the parameters that characterize the root growth of two cereals: barley (*Hordeum vulgare* L.) and maize (*Zea mays* L.), and determine the influence of root growth on these systems with the formation of soil aggregates, under different agricultural management. The AC allowed adequate growth of the root systems and the formation of aggregates, while the LZ-rMM treatment (tillage without residues and maize monoculture) resulted in the lowest physical quality aggregate formation and growth of roots. Barley root growth improved soil structure compared to maize. The root length density (RLD) of barley had a positive correlation with the presence of meso- and macroaggregates and a negative correlation with the presence of microaggregates. Therefore, this parameter can be used as an indicator of aggregation. The surface area (AS) and root biomass (BR) of Barley may be used as indicators of meso- and macro aggregation but not of microaggregation. The same correlation was found for the root:shoot ratio (BR/BA) in both studied crops.

Keywords: tillage, conservation agriculture, roots, aggregation.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados campus Montecillo por abrirme las puertas y brindarme un lugar en sus instalaciones para completar esta parte de mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de Maestría. Pero sobretodo a los mexicanos que con sus impuestos financian este apoyo y espero nunca defraudarlos.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT) por la beca otorgada para terminar la tesis de Maestría.

Al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMyT) y al proyecto Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional (MASAGRO).por permitirme trabajar en el experimento de Agricultura de Conservación a largo plazo para esta investigación.

A los miembros de mi consejo particular:

Al Dr. Bram Govaerts por dirigir este proyecto y darme la oportunidad de trabajar en las parcelas experimentales de CIMMyT y por permitirme formar parte del grupo de Agricultura de Conservación.

Al Dr. Jorge D. Etchevers muy especialmente, por sus conocimientos acerca de la ciencia, pero sobre todo por su calidez humana, su amistad y las lecciones de vida que me ofreció, gracias a ellas sé que hay que luchar por lo que se quiere y nunca bajar las manos. Muchas gracias.

A la Dra. Mariela Fuentes por sus valiosas observaciones a este trabajo y por todos los cuestionamientos que me hicieron poder llegar a concluir y aprender acerca de como se hace la ciencia sin tener que descubrir el hilo negro.

Al Dr. Fernando de León por sus tan atinados comentarios en la discusión de este manuscrito.

En especial al Dr. Juan Manuel Herrera del CIMMyT por su paciencia en las revisiones. Por su gran apoyo en la redacción de este documento y en especial gracias por compartir su gran experiencia al trabajar con raíces.

A la Dra. Nele Verhulst por los comentarios que ayudaron a enriquecer esta investigación.

A la Dra. Claudia Hidalgo por todos sus consejos y en un inicio abrirme las puertas del Colegio de Postgraduados.

A la Dra. Carmen Gutiérrez Castorena por acceder por sus conocimientos, apoyo y amistad. Por acceder a ser sinodal de esta tesis.

Al Dr. Tulio Arredondo y al Instituto Potosino de Ciencia y Tecnología (IPICyT) por las facilidades otorgadas para el análisis de imágenes de las raíces y por la hospitalidad en mi estancia en San Luis Potosí.

Al personal de CIMMyT en especial a Maricela Rugerio, por la ayuda en el laboratorio, a Beto por su ayuda en campo y a Alejandra Soto y Norma Hernández por todas las facilidades administrativas ofrecidas.

A los integrantes del laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental en especial a la M. en C. Juliana Padilla, Dulce, Francisco, Guille, Leo y Mariana por el apoyo en laboratorio pero sobre todo por su compañía y amistad.

A los compañeros del CP en especial a Humberto, Luis, Enrique y Dulce por su ayuda, compañía en los viajes y los ratos de diversión que compartimos.

DEDICATORIA

Con especial dedicatoria a Hilaria Guerrero y Karina Brena, en donde sea que se encuentren.

A todos los mexicanos que luchan por la libertad, justicia e igualdad de éste nuestro hermoso país y que siguen creyendo que la ciencia, la cultura y la educación son los motores de cambio para futuras generaciones.

A mis padres Susana y Juan Carlos gracias por todo su apoyo, paciencia, dedicación y empeño. Por enseñarme con el ejemplo.

A mi hermano Alejandro, su esposa Elsa y al pequeño Raziell, por todo su apoyo y felicidad que me han dado.

A mis amigos que siempre están en las buenas y en las malas, por todas las enseñanzas y por su amistad sincera.

A la Familia Brena Bustamante por abrirme las puertas de su casa.

A Paulina mi compañera de viaje, de sueños y de vida. Gracias por alumbrar mi vida con tu presencia. TE AMO.

Es deseable que el espíritu impulse a la música y otras artes y ciencias y otras formas de hacer que renazca la vida, permitan a nuestro país escapar de la pudrición que no es destino inexorable. Sé que es un deseo pueril, ingenuo, pero en él creo, pues he visto que esa mutación se concrete.

Miguel Ángel Granados Chapa

La tierra es cuna y sepultura, madre y compañera. Se le ofrece el primer trago y el primer bocado; se le da descanso, se la protege de la erosión.

Eduardo Galeano

LISTA DE ABREVIATURAS

-r Remoción de residuos de cosecha anterior	COS Carbono Orgánico del suelo
+r Retención de residuos de cosecha anterior	DMP Diámetro medio ponderado
AC Agricultura de Conservación	DP Diámetro promedio de las raíces
ANDEVA Análisis de varianza	LC Labranza convencional
AS Área superficial de raíces	LZ Labranza cero
BA Biomasa Aérea	MC Rotación maíz-cebada
BR Biomasa radical	MM Monocultivo maíz
BR/BA Relación biomasa radical aérea	MO Materia orgánica
CC Monocultivo de cebada	MOP Materia orgánica Particulada
CM Rotación cebada-maíz	MOS Materia orgánica del suelo
	RLD densidad radical

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Teorías de la agregación del suelo: dinámica y formación.	4
2.2 Interacción raíces-agregados	11
2.2.1 Penetración de Raíces.....	11
2.2.2 Modificación del régimen hídrico	12
2.2.3 Exudados	14
2.2.4 Entrelazamiento de raíces	16
2.2.5 Descomposición de raíces muertas.....	17
2.3 Efecto del manejo agronómico sobre el desarrollo radical y la agregación del suelo	19
2.3.1 Longitud y distribución de raíces	20
2.3.2 Biomasa radical.....	22
2.3.3 Cambios en la formación y estabilidad de los agregados del suelo.....	22
3. OBJETIVO E HIPÓTESIS	26
3.1 Objetivo general.	26
3.1.1 Objetivos Particulares	26
3.2 Hipótesis general.	27
3.2.1 Hipótesis Particulares	27
4. MATERIALES Y MÉTODOS	28
4.1 Mediciones morfométricas de las raíces	30
4.2 Determinación de agregados en húmedo.....	32
4.3 Análisis estadístico.....	34
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
5.1. Mediciones morfométricas de las raíces	35
5.1.1 Densidad, área superficial y diámetro promedio de las raíces.....	35
5.1.2 Biomasa aérea, radical y relación biomasa radical/aérea	41
5.2 Distribución y estabilidad de agregados.	48
5.3 Relación de las variables morfométricas y la agregación del suelo.....	501
6. CONCLUSIONES	59
7. REFERENCIAS	61

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Probabilidad de error (P) de las variables morfométricas RLD, DP y AS de las raíces de cultivos de maíz y cebada obtenidas a 0-20 cm de profundidad de los diferentes tratamientos.	35
Cuadro 2. Probabilidad de error (P) de las variables morfométricas biomasa aérea, biomasa radical y BR/BA de los cultivos de maíz y cebada a 0-20 cm de profundidad de los diferentes tratamientos.	42
Cuadro 3. Probabilidad de error (P) del diámetro medio ponderado (DMP), porcentaje de micro, meso y macroagregados del suelo 0-20 cm de profundidad de los diferentes tratamientos.	48
Cuadro 4. Distribución de micro, meso, macroagregados y diámetro medio ponderado de los agregados del suelo a 0-20 cm de profundidad. Labranza convencional (LC), Labranza cero (LZ), con residuos (+r), sin residuos (-r), Monocultivo de maíz (MM) cebada (CC) y rotación maíz-cebada (MC) y cebada-maíz (CM).....	49
Cuadro 5. Coeficiente de correlación de Pearson (r) de los parámetros morfométricos densidad radical (RLD), área superficial (AS), diámetro promedio (DP), biomasa radical (BR) y relación biomasa radical/aérea (BR/BA) de las plantas de maíz y cebada con el diámetro medio ponderado (DMP), porcentaje de microagregados (%MI), mesoagregados (%ME) y macroagregados (%MA) del suelo 0-20 cm de profundidad.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Interacción de los principales factores que intervienen en la formación y estabilización de agregados. Adaptado de Six <i>et al.</i> (2004).....	4
Figura 2. Teoría de la “Jerarquía de los agregados” de Tisdal y Oades (1982) y la modificación de Oades (1984). Adaptado de Six <i>et al.</i> , (2004).	6
Figura 3. “Ciclo de vida” de un macroagregado, donde se demuestra la formación de microagregados al interior de macroagregados; así como la acumulación vs. la mineralización de C orgánico asociado con la agregación. La formación y estabilización de agregados se lleva a cabo por la unión de MOP unida a excreciones de microorganismo y mucus de lombrices, si esta actividad microbiana decrece disminuye la formación y eventualmente se generaran perturbaciones. Disrupciones como la labranza disminuyen la formación de nuevos microagregados dentro de macroagregados y la protección de la SOM en estos microagregados. Tomado de Six <i>et al.</i> (2000).....	9

Figura 4. Evolución de agregados estables en agua durante la incubación de glucosa no modificada y mucilago de maíz modificado (Adaptado de Morel <i>et al.</i> , 1991).	15
Figura 5. Procesos físicos, biológicos y químicos donde actúan las hifas y su influencia en la estructura y agregación del suelo (Adaptado de Rillig y Mummey, 2006).....	17
Figura 6. Modelo hipotético de las relaciones causales entre las raíces, hifas de micorrizas y tres sumideros de carbono. Los encabezados de una flecha significan una relación causal directa, dos puntas indican las correlaciones analizadas. Los números son coeficientes de cambio, la varianza total explicada (negritas) y en elipses la varianza no explicada. Adaptado de Jastrow <i>et al.</i> (1998).....	24
Figura 7. Distribución espacial de las raíces y los agregados en diferentes grados de desarrollo pedogenético. a) Sección delgada vertical (girasol 0-7 cm, centrada en la raíz) y b) mapa de raíces y agregados y su relación con la porosidad del suelo (en paréntesis). Adaptado de De León-González <i>et al.</i> , (2007).	25
Figura 8. Precipitación en los años 2010 (Enero-Diciembre) y 2011 (solo de Enero-Mayo), en la estación experimental del Batán (CIMMYT), Texcoco. Datos de la estación meteorológica CIMMYT.	28
Figura 9. Vista aérea del Experimento a largo plazo en El Batán, Texcoco. Las parcelas enmarcadas con color y el número representan el número y localización de las parcelas empleadas en esta investigación.....	30
Figura 10. Monolito con la raíz y parte aérea.	31
Figura 11. Raíces después de ser secadas. Cebada (izquierda) y maíz (derecha)	32
Figura 12. Columna empleada para tamizar los agregados en húmedo.....	33
Figura 13. Correlación de la densidad radical (RLD) con el área superficial (AS) de las raíces de maíz (a) y cebada (b) en los diferentes tratamientos.....	36
Figura 14. (a) Densidad (RLD) y (b) área superficial (AS) de las raíces de maíz y cebada de 0-20 cm de profundidad en parcelas con Labranza cero (LZ), Labranza convencional (LC), monocultivo de Maíz (MM), monocultivo de cebada (CC), rotación maíz-cebada (MC), rotación cebada-maíz (CM), sin residuos (-r) y con residuos (+r). Líneas en las barras corresponden al error estándar. Letras diferentes muestran tratamientos con diferencias significativas. Coeficiente de variación RLD= 115 % y AS= 111 % de AS.	38

Figura 15. Diámetro Promedio de las raíces de maíz y cebada 0-20 cm de profundidad de los diferentes tratamientos. Labranza cero (LZ), Labranza convencional (LC), monocultivo de Maíz (MM), monocultivo de cebada (CC), rotación maíz-cebada (MC), rotación cebada-maíz (CM), sin residuos (-r) y con residuos (+r). Líneas en las barras corresponden al error estándar. Letras diferentes demuestran tratamientos con diferencias significativas. Coeficiente de variación DP=276%..... 41

Figura 16. Biomasa aérea (BA) de las plantas de maíz y cebada de los tratamientos a una profundidad de 0-20 cm. Líneas en las barras corresponden al error estándar. Labranza cero (LZ), Labranza convencional (LC), monocultivo de Maíz (MM), monocultivo de cebada (CC), rotación maíz-cebada (MC), rotación cebada-maíz (CM), sin residuos (-r) y con residuos (+r). Letras diferentes demuestran tratamientos con diferencias significativas. Coeficiente de variación BA= 151% 42

Figura 17. Biomasa radical de las plantas de maíz y cebada 0-20 cm de profundidad de los diferentes tratamientos. Labranza cero (LZ), Labranza convencional (LC), monocultivo de Maíz (MM), monocultivo de cebada (CC), rotación maíz-cebada (MC), rotación cebada-maíz (CM), sin residuos (-r) y con residuos (+r). Líneas en las barras corresponden al error estándar. Letras diferentes demuestran tratamientos con diferencias significativas. Coeficiente de variación BR= 174%..... 44

Figura 18. Relación Biomasa radical/aérea 0-20 cm de profundidad de los diferentes tratamientos. Líneas en las barras corresponden al error estándar. Labranza cero (LZ), Labranza convencional (LC), monocultivo de Maíz (MM), monocultivo de cebada (CC), rotación maíz-cebada (MC), rotación cebada-maíz (CM), sin residuos (-r) y con residuos (+r). Letras diferentes demuestran tratamientos con diferencias significativas. Coeficiente de variación BR/BA= 230.27 % 46

Figura 19. Correlación de la densidad radical (RLD) de las plantas de cebada con el porcentaje de microagregados (a), mesoagregados (b) y macroagregados (c) del suelo 0-20 cm de profundidad. Labranza convencional (LC), Labranza cero (LZ), con residuos (+r), sin residuos (-r), Monocultivo de maíz (MM) cebada (CC) y rotación maíz-cebada (MC) y cebada-maíz (CM)..... 52

Figura 20. Correlación del área superficial (AS) de las raíces de cebada con el porcentaje de mesoagregados (a) y macroagregados (b) del suelo 0-20 cm de profundidad. Labranza convencional (LC), Labranza cero (LZ), con residuos (+r), sin residuos (-r), Monocultivo de maíz (MM) cebada (CC) y rotación maíz-cebada (MC) y cebada-maíz (CM)..... 54

Figura 21. Correlación del diámetro promedio (DP) de las raíces de cebada con el porcentaje de microagregados (a) y mesoagregados (b) del suelo 0-20 cm de profundidad. Labranza convencional (LC), Labranza cero (LZ), con residuos (+r),

sin residuos (-r), Monocultivo de maíz (MM) cebada (CC) y rotación maíz-cebada (MC) y cebada-maíz (CM)..... 55

Figura 22. Correlación de la biomasa radical (BR) de las plantas de cebada con el porcentaje de mesoagregados (a) y macroagregados (b) del suelo 0-20 cm de profundidad. Labranza convencional (LC), Labranza cero (LZ), con residuos (+r), sin residuos (-r), Monocultivo de maíz (MM) cebada (CC) y rotación maíz-cebada (MC) y cebada-maíz (CM)..... 57

Figura 23. Correlación de la biomasa radical/aérea (BR/BA) de las plantas de cebada con el porcentaje de mesoagregados (a) y macroagregados (b) del suelo 0-20 cm de profundidad. Labranza convencional (LC), Labranza cero (LZ), con residuos (+r), sin residuos (-r), Monocultivo de maíz (MM) cebada (CC) y rotación maíz-cebada (MC) y cebada-maíz (CM)..... 58

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el aumento de la pérdida de suelos en México por erosión se ha convertido en un grave problema ambiental. En el año 2002 el 45.2% de la superficie del país presentaba algún grado de degradación inducida por el hombre. Los procesos más importantes de degradación fueron la química (principalmente por la pérdida de fertilidad), la erosión hídrica y la erosión eólica. Estos tres procesos fueron responsables del 87% de los suelos degradados en el país. Entre las principales causas de degradación se identificaron el cambio de uso del suelo para fines agrícolas y el sobrepastoreo (17.5% en ambos casos), la deforestación (7.4%) ocupa el tercer lugar, seguida de la urbanización (1.5%). Los suelos degradados tienen en común la afectación de la cubierta vegetal, que coadyuva a la conservación del suelo (SEMARNAT 2002). Al provocar estos efectos sobre los suelos, estaremos impactando severamente sobre uno de los recursos naturales más importantes. Ya que suelo funciona como un filtro natural del agua, el aire y compuestos tóxicos. Así mismo es un componente clave en los procesos climatológicos (al actuar como una geomembrana que regula los ciclos biogeoquímicos de la Tierra) y la topografía. El suelo también alberga una gran cantidad de animales y plantas, que si alteramos sus ciclos biológicos, ponemos en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria de nuestro país. Debido a que existen pocas tierras con aptitud agrícola en México, es de vital importancia conservar la productividad de éstas.

El uso excesivo de la labranza es una de las principales causas de la pérdida de la fertilidad del suelo agrícola, afecta de manera directa la calidad del mismo y reduce su capacidad productiva. La labranza modifica la temperatura del suelo, produce procesos de compactación, rompe la continuidad y estructura del suelo y presumiblemente altera el crecimiento de los sistemas radicales de las plantas.

Varias han sido las innovaciones y técnicas sugeridas e implementadas para aumentar la productividad y sostenibilidad de los sistemas agrícolas y por ende la calidad del suelo en las zonas altas del subtrópico mexicano. Una de ellas es la Agricultura de Conservación (AC), la cual se fundamenta en tres principios básicos: (1) rotación de cultivos, que ayuda a interrumpir los ciclos de vida de patógenos del suelo y malezas; (2) mínima perturbación del suelo, que combinada con la retención de residuos vegetales reduce la erosión e incrementa la eficiencia en el uso del agua; y (3) retención de residuos del cultivo anterior, la combinación de los dos últimos principios permite reducir la erosión e incrementar la eficiencia en el uso del agua. Los factores mencionados, permiten crear un mantillo vegetal que evita la pérdida de agua por evaporación, disminuir la temperatura y establecer las condiciones para una mayor estabilidad de la estructura de los agregados del suelo. Así pues los suelos con una estructura adecuadamente desarrollada proveen condiciones benéficas para el establecimiento de los cultivos, reflejándose en la optimización del uso del agua y el aumento de los rendimientos netos de los cultivos y de la fertilidad física y química del suelo. Sin embargo algunos autores como Turrent-Fernández *et al.* (1996), Uribe *et al.* (1998), Uribe *et al.* (2002) y Turrent-Fernández (2009) han cuestionado la implementación de la AC mencionando que los pequeños productores son beneficiados en menor medida que los grandes productores, existe falta de tecnología apropiada para unidades de pequeña producción nuestro país y en los terrenos que se encuentran en laderas, la erosión hídrica rebasa las ventajas a largo plazo de la Agricultura de Conservación.

La Agricultura de Conservación repercute de manera directa sobre el crecimiento de las raíces (haciéndolo más horizontal) y éstas a su vez influyen en la formación de los agregados del suelo como agentes cementantes secundarios (Six *et al.*, 2004). Los procesos en los que participan las raíces para la formación de agregados del suelo son: 1) su crecimiento y elongación, 2) penetración y exploración del suelo, 3) cambio del régimen hídrico del suelo, 4) producción de exudados o mucílagos, 5) descomposición de raíces muertas y 6) entrelazamiento

con otras raíces (Six *et al.*, 2004). Las raíces de diferentes cultivos (cereales de grano grande y grano pequeño), responden de manera diferente cuando se cultivan bajo AC que cuando se cultivan en labranza convencional (LC). Algunas variables morfológicas de las raíces han sido estudiadas y los cambios mayormente se presentan en la densidad radical (RLD), el diámetro promedio (DP), el área superficial (AS), la biomasa radical (BR) y la relación biomasa radical/aérea (BR/BA) (Donald *et al.*, 1987; Ball-Coelho *et al.* 1998; Sidiras *et al.* 2001; Qin *et al.* 2004, 2005; Gregory *et al.*, 2006). Sin embargo es necesario ampliar el conocimiento de como los sistemas radicales se correlacionan con los parámetros que caracterizan la estructura y estabilidad del suelo, y como este último es modificado por el desarrollo de las raíces.

La finalidad de esta investigación fue relacionar algunas variables morfológicas de las raíces (densidad radical, área superficial, diámetro promedio, biomasa radical, y la relación biomasa radical/aérea) de maíz y cebada con las proporciones de agregados en el suelo, en un experimento de larga duración (establecido en 1991), en la estación experimental de “El Batán”, Texcoco, Estado de México, del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). El experimento consta de un conjunto básico de tratamientos, los cuales no han sido modificados desde el inicio, y que consisten de diferentes tipos de manejo agronómico: labranza convencional (LC) y labranza cero (LZ), con (+r) y sin residuos (-r), combinado con monocultivos o rotación de maíz y trigo (en algunas ocasiones como el año en que se realizó este trabajo se empleó cebada en lugar de trigo).

Se intentó y logró encontrar parámetros morfológicos de las raíces que sirviesen de indicadores de la formación de agregados del suelo y proponer alternativas para el manejo de agroecosistemas en condiciones de temporal, ubicados en el subtrópico de altura del país.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Teorías de la agregación del suelo: dinámica y formación.

Antes de la década de los años 50 la investigación acerca de la formación y estabilidad de los agregados del suelo se concentró en reconocer los principales factores que influían en la agregación del suelo. Estos factores fueron identificados como: 1) fauna del suelo, 2) microorganismos, 3) raíces, 4) agentes cementantes inorgánicos y 5) variables ambientales (Figura 1). Se priorizó la investigación de los hongos micorrízicos y saprófitos, así como los diferentes microorganismos relacionados con la estabilización de los agregados. Otras líneas de investigación menos socorridas fueron: el rol de raíces como agente estabilizador de los agregados del suelo, la relación de los agentes cementantes inorgánicos en la agregación (específicamente el calcio y los oxi-hidróxidos) y los impactos de los procesos físicos de secado-humedecimiento-congelación en la agregación (Six *et al.*, 2004).

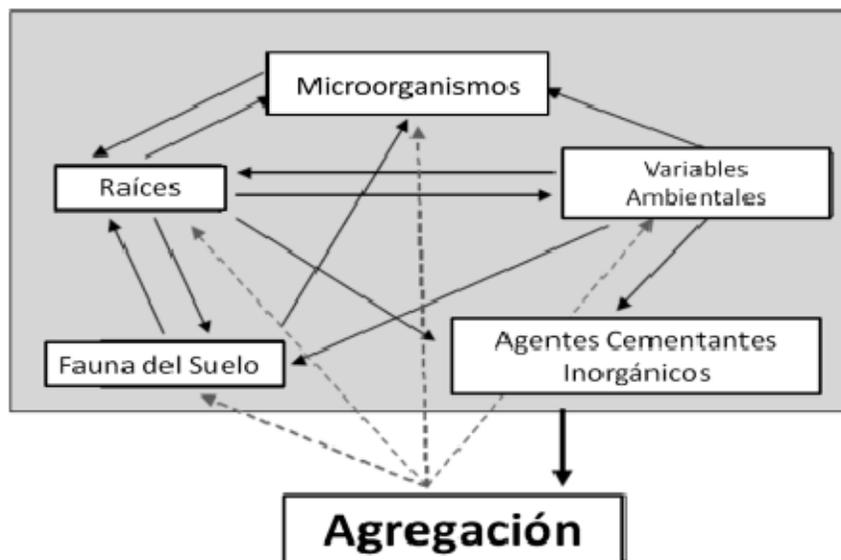


Figura 1. Interacción de los principales factores que intervienen en la formación y estabilización de agregados. Adaptado de Six *et al.* (2004).

El primer modelo conceptual acerca de la formación de los agregados del suelo y la relación con la materia orgánica fue el de Emerson (1959). Este modelo propone el término “migajas del suelo” (soil crumb, en inglés) para denominar a los

agregados y los define como una unión entre partículas orientadas de cuarzo y arcilla, donde la materia orgánica del suelo (MOS) funge como agente cementante. La materia orgánica sólo podía estar asociada en cantidades proporcionales a la superficie de las arcillas y al cuarzo; es decir sólo podía existir una monocapa que ligaba estos complejos (cuarzo-arcilla), los cuales eran alterados debido al rompimiento de la ligadura por la expansión de las arcillas (Emerson, 1977).

La propuesta de la teoría de la formación de los microagregados de Edwards y Bremner (1967), fue prevista como una reacción en fase sólida entre la materia orgánica (MO), metales polivalentes (P) como Fe, Al o Ca y arcillas eléctricamente neutras (A). A diferencia del modelo de Emerson que proponía que los granos de arena eran constituyentes primarios para la formación de microagregados, Edwards y Bremner mencionaron que los agregados mayormente estables eran los que estaban compuestos por arena fina y limos de tamaño de partícula $< 250 \mu\text{m}$, que se constituían de arcilla-metal polivalente-complejos de materia orgánica (A-P-MO), al igual que los propuestos por Emerson (1977). En este modelo conceptual (Edwards y Bremner, 1967), también se previeron los enlaces arcilla-metal polivalente-arcilla (A-P-A) y materia orgánica-metal polivalente-materia orgánica (MO-P-MO) y postularon que la materia orgánica dentro de los microagregados es inaccesible para los microorganismos y queda protegida físicamente.

Un importante aporte a la teoría de la formación y estabilización de los agregados fue realizado por Tisdall y Oades (1982), a través del concepto de la “organización jerárquica” de la agregación. En ésta se postuló que las partículas primarias y los agentes cementantes que conforman a los agregados actúan de manera jerárquica para su formación; es decir las partículas primarias del tamaño de los limos ($< 20 \mu\text{m}$) se encuentran unidas por agentes cementantes persistentes (materia orgánica humificada, metales polivalentes y complejos catiónicos), óxidos y aluminosilicatos desordenados, formando los microagregados

(20-250 μm). Posteriormente los microagregados formarán macroagregados (> 250 μm) unidos por cementantes temporales o secundarios (hifas de hongos y raíces) y transitorios (polisacáridos derivados de plantas y animales) y la estabilidad de estos últimos depende del manejo agronómico que se le brinde al suelo. Dos años más tarde de haber propuesto el modelo jerárquico, Oades (1984) realizó importantes modificaciones a dicha teoría, ya que hasta entonces se creía que los agregados se formaban de una manera secuencial; es decir, que las partículas < 20 μm se unían para dar origen a un microagregado y éstos a su vez se acomodaban de tal manera que formaban un macroagregado. Este autor se percató que las raíces así como las hifas mantienen unidos a los macroagregados y que la descomposición de estos agentes temporales de cementación permitía la formación de microagregados dentro del núcleo de los macroagregados, modificando el orden secuencial de formación (Figura 2).

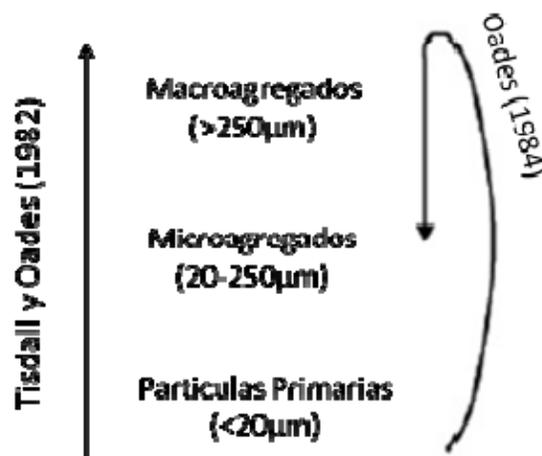


Figura 2. Teoría de la “jerarquía de los agregados” de Tisdall y Oades (1982) y la modificación de Oades (1984). Adaptado de Six *et al.*, (2004).

Una vez propuesto y aceptado el modelo de la jerarquía de los agregados, fue probado para explicar la pérdida de materia orgánica del suelo (MOS) debido al manejo agronómico, enunciando que los macroagregados contienen una mayor cantidad de MOS lábil y menos procesada que los microagregados y que dicha MOS era perdida cuando se practicaba la labranza. Esto genera un enlace directo entre las perturbaciones generadas por la agricultura y el decremento de la agregación con la consecuente pérdida de MOS lábil. Como consecuencia de

estas aseveraciones se realizaron dos observaciones adicionales: 1) que el aumento de la concentración de carbono (C) se relacionaba directamente con el incremento en el tamaño de los macroagregados y 2) que el contenido de C nuevo era más alto y más lábil en los macroagregados que en los microagregados (Elliott, 1986).

Oades y Waters (1991) propusieron, varias pruebas para medir la agregación estable al agua: 1) humedecimiento lento, 2) humedecimiento rápido, 3) agitación durante 16 horas y 4) sonicación, mismas que realizaron en dos Alfisoles, dos Molisoles y un Oxisol. Su conclusión fue que la teoría de la jerarquía de los agregados sólo se cumple en suelos donde la estabilización y formación está directamente relacionada con la materia orgánica como agente cementante y el tipo de arcillas 2:1 (como es el caso de los Molisoles y Alfisoles); mientras no sucede lo mismo cuando los agentes cementantes son predominantemente óxidos de hierro y el tipo de arcillas es de 1:1 como en los Oxisoles.

En 1986, Elliott y Coleman revisaron el concepto de la formación de microagregados dentro de los macroagregados y describieron de la misma manera ordenada cuatro categorías jerárquicas de poros: 1) macroporos, 2) poros entre macroagregados, 3) poros entre microagregados, pero dentro de los macroagregados y 4) poros dentro de los microagregados. Esta clasificación ayudó de manera significativa al entendimiento de los procesos de las redes tróficas de los microorganismos del suelo. Posteriormente, Dexter (1988) formuló el “Principio de exclusión de porosidad” el cual propone que los agregados de un orden jerárquico inferior excluyen los espacios porosos entre los bloques de construcción de agregados de órdenes jerárquicos superiores, poniendo en evidencia que este modelo y el modelo jerárquico global dan lugar a la misma relación jerárquica entre los agentes cementantes y los órdenes de agregados.

Shipitalo y Protz (1989) presentaron un modelo para la formación de microagregados dentro de las galerías de las lombrices, contrastando con otros

modelos, las lombrices promueven la formación de núcleos de MO (microagregados). La ingestión tanto de hojarasca, arcilla, minerales y materiales orgánicos, promueven la unión de estos componentes para la formación de microagregados dentro del tracto digestivo de las lombrices, los cuales serán excretados y los procesos de humedecimiento-secado, facilitan el fortalecimiento del enlace de materiales orgánicos e inorgánicos, que estabilizan a los microagregados

Golchin *et al.*, (1994a, 1994b) aportaron conocimientos acerca de los mecanismos de formación, estabilización y degradación de los microagregados. Los materiales vegetales frescos inducen la formación de microagregados, estimulando la producción de biomasa microbiana que funge como agente cementante. Durante la descomposición de dicho material vegetal la materia orgánica particulada (MOP) comienza a unirse con partículas de arcilla y forma núcleos de microagregados enlazados por mucílagos de microorganismos. Conforme la MOS es consumida la actividad microbiana y la producción de mucilagos decae y esto conlleva a la pérdida de estabilidad de los microagregados. A medida que los microagregados pierden su estabilidad liberan subproductos microbianos para formar compuestos complejos estables órgano-minerales de tamaño de los limos, para volver al ciclo de la agregación del suelo.

Posteriormente Angers *et al.* (1997) presentaron evidencias convincentes de que los microagregados se forman dentro de los macroagregados. Al seguir la descomposición del C, marcándolo con un isotopo estable ^{13}C . Estos autores demostraron que el carbono inicialmente aumentaba y se encontraba en los macroagregados, pero que cuando se reducía el ^{13}C se localizaba en los microagregados, haciendo que esta redistribución del C fuese una clara evidencia de que los microagregados eran formados dentro de los macroagregados.

En la última década se han presentado algunos modelos de formación de agregados. Uno de ellos es el de Six *et al.* (2000) quienes proponen un modelo

(Figura 3) en el que la formación de los agregados del suelo sólo se lleva a cabo donde la materia orgánica del suelo (MOS) es el mayor cementante. Los autores citados anteriormente refuerzan las ideas: 1) que los microagregados se forman dentro de los macroagregados, 2) la materia orgánica particulada derivada de las raíces es un factor importante en la dinámica de los agregados, 3) la actividad de las lombrices desempeña un papel decisivo en la formación de macro y microagregados, 4) la MOS es generalmente estabilizada en los microagregados, lo que vuelve al C orgánico más recalcitrante y 5) los cambios en la tasa de estabilización de macroagregados son afectados por la MOS en función del tipo de suelo y regímenes de perturbación.

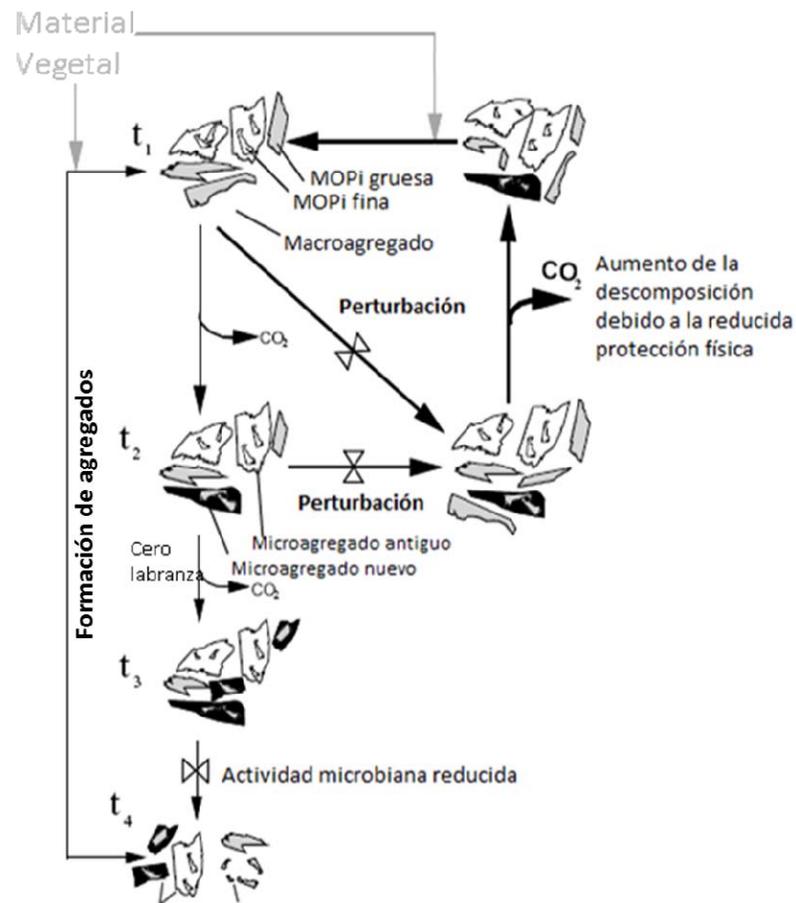


Figura 3. "Ciclo de vida" de un macroagregado, donde se demuestra la formación de microagregados al interior de macroagregados; así como la acumulación *versus* la mineralización de C orgánico asociado con la agregación. La formación y estabilización de agregados se lleva a cabo por la unión de MOP unida a excreciones de microorganismos y mucus de lombrices, si esta actividad microbiana decrece disminuye la formación y eventualmente se generan perturbaciones. Disrupciones como la labranza disminuyen la formación de nuevos microagregados dentro de macroagregados y la protección de la SOM en estos microagregados. Tomado de Six *et al.* (2000).

Rasse *et al.* (2000) sugirieron con base en observaciones realizadas en experimentos con alfalfa (*Medicago sativa* L.) que la materia orgánica de los brotes aéreos y las raíces frescas contribuyen a promover la formación de agregados. La estabilización respondería a los procesos de humedecimiento y secado del suelo, en los cuales las raíces desempeñan un papel vital, ya que debido a la absorción del agua, generan cambios en las propiedades hidráulicas y reduciendo las tasas de evaporación. Los últimos autores citados sugieren que la estabilidad de los agregados es mayormente afectada por la fuente de C de los brotes superficiales y la descomposición de las raíces, así como por el entrelazamiento con micorrizas arbusculares (MA) para la formación de agregados del suelo.

Malamoud *et al.* (2009) propusieron que el C orgánico sería fundamental para la cementación de los microagregados y como fuente de energía para la biomasa microbiana. Las relaciones entre la arcilla y el C orgánico, según estos autores pueden ser simples o complejas originando agregados de distintos tamaños. Proponen tres tipos de agregados tipo₁ que corresponde a relaciones órgano-minerales primarias, tipo₂ considerados como microagregados (63-250 μm) y tipo₃ o macroagregados (>250 μm).

2.2 Interacción raíces-agregados

2.2.1 Penetración de Raíces

Las raíces cuando crecen ejercen presiones sobre el suelo de hasta 2 MPa (Reid y Goss, 1982), ampliando los poros existentes y creando otros nuevos, generan un mayor empaquetamiento de las partículas y microagregados, modificando la disposición de las partículas de arcilla (Dorioz *et al.*, 1993). Cerca de la zona de influencia de las raíces, la densidad aparente del suelo incrementa del 12 y hasta 35% (Young, 1998) con respecto al suelo que no está en la zona de influencia radical. Estas modificaciones ocurren entre los 50-200 μm de la zona de influencia de las raíces, produciendo un aumento en la estabilidad de los agregados del suelo (Caravaca *et al.*, 2002) que induce a la formación de microagregados y decreciendo la formación de macroagregados (que serán creados después por la unión de microagregados) (Dorioz *et al.*, 1993). Las raíces promueven cambios en los poros de magnitud $> 30 \mu\text{m}$ denominados macroporos (Gibbs y Reid, 1998), los cuales participan activamente en la conducción del agua por la matriz del suelo. La tasa de infiltración es modificada por el estado fisiológico de las raíces (vivas o muertas), en donde las raíces vivas cuentan con una película saturada de agua en su exterior que elimina la contracción y facilita la absorción (Barley, 1954; Mitchell *et al.*, 1995). Las raíces vivas provocan cambios en las curvas de retención y potencial hídrico del suelo, que dan como resultado un cambio en la geometría, arquitectura y conectividad de los poros. Se puede comprobar que los poros de mayor diámetro se encuentran en la rizósfera y a los de menor diámetro en el suelo fuera de ella (Materechera *et al.*, 1994; Whalley *et al.*, 2005).

Como un ejemplo claro del efecto de la penetración de las raíces en la dinámica del agua, se tiene el caso de la alfalfa (*Medicago sativa* L.) que se caracteriza por un sistema radical de gran longitud y diámetro, que promueve el flujo del agua por los macroporos, (Meek *et al.*, 1990; Mitchell *et al.*, 1995; Caron

et al., 1996). Meek *et al.*, (1989) reportaron un aumento del 27% de los macroporos debido a las raíces de la alfalfa, y estos fueron ubicados de 0-20 cm y se extendieron hasta una profundidad de 50 cm. Mitchell *et al.*, (1995) utilizaron un colorante para identificar los poros producidos por el crecimiento de las raíces de alfalfa y comprobaron que el crecimiento de las raíces producía poros hasta una profundidad de 55 cm. Meek *et al.*, (1989 y 1990) demostraron un aumento progresivo de la infiltración de agua con el tiempo por efecto de la penetración de las raíces de alfalfa. Cabe resaltar que los sistemas radicales de diferentes especies vegetales, no afectan de igual manera la dinámica de la formación de agregados del suelo (Chan y Heenan, 1999; Whalley *et al.*, 2005).

En la mayoría de los casos se lleva a cabo un efecto sinérgico entre la penetración de las raíces (tomando en cuenta su arquitectura) y la actividad de la fauna del suelo, en especial las lombrices. La continuidad del sistema de poros es modificada por la penetración de las raíces y propicia la formación de nuevos agregados. Esto sugiere que existe una mayor proporción de agregados pequeños en suelos cultivados con respecto a los no cultivados, debido al rompimiento de agregados mayores por acción de las raíces de las plantas cultivadas en grandes cantidades (Materrechera *et al.*, 1994). En conclusión la penetración de raíces disminuye las proporciones relativas de macroagregados inestables y aumenta la proporción de microagregados estables. Sin embargo el efecto de la penetración de las raíces sobre la agregación se da a través de una interacción entre la arquitectura de las raíces (por ejemplo, magnitud de ramificaciones laterales o grosor) y las características estructurales del suelo (granulometría, compactación y textura) (Carter *et al.*, 1994).

2.2.2 Modificación del régimen hídrico

En relación a las condiciones hídricas del suelo, la actividad de las raíces promueve: 1) por la absorción de agua, se secan zonas específicas promoviendo la unión de las arcillas con los exudados orgánicos de las primeras, formando agregados (Reid y Goss, 1982); 2) los exudados tapan los poros reduciendo el

humedecimiento y el rompimiento de los agregados antes formados (Caron *et al.*, 1996) y 3) que el agua fluya mayormente por las raíces vivas (Rasse *et al.*, 2000). Las raíces modifican el balance iónico y osmótico en la rizósfera mediante la absorción de nutrientes y la rizodepositación (Bronick y Lal, 2005). Estos tres procesos conducen al cambio en la frecuencia de los procesos de humedecimiento y secado del suelo (Whalley, 2005). Los cambios en los procesos antes mencionados repercuten de manera directa en la formación de los agregados del suelo.

En función del tipo y contenido de arcillas los suelos muestran un potencial para reducir o aumentar su tamaño (Ravina, 1983). La pérdida de volumen en algunos tipos de suelo al secarse da lugar al desarrollo de grietas que pueden ser tan grandes como 5 cm y se pueden extender a profundidades de 80 cm o más, dependiendo de las condiciones edafológicas y climáticas, así como la presencia y tipo de vegetación. Los procesos de humedecimiento y secado en el suelo influyen en el grado de fragmentación del suelo, la formación de grietas por influencia de la desecación genera la fragmentación y la formación de agregados (Angers y Caron, 1998). La formación de micro-fisuras en el suelo está dada por la humectación rápida del suelo que lo conduce a una condición de mayor friabilidad (Dexter, 1991), que conjuntamente con el crecimiento de la vegetación controlan la magnitud, frecuencia y efectos sobre los ciclos de agregación (Semmel *et al.*, 1990; Caron *et al.*, 1992; Materechera *et al.*, 1992). La repetición continua de ciclos de humedecimiento y secado asociado con el crecimiento radical de las especies vegetales originan mayor número de microagregados, debido a los patrones de resistencia y tensión tan heterogéneos que generan las raíces al momento de la extracción del agua (Materechera, 1992). La arquitectura de las raíces es la encargada de promover un cambio en la estructura del suelo, principalmente en la conectividad de los poros, los cuales se reordenan mejorando el drenaje e incrementando los potenciales mátricos de la rizósfera, mostrando en todos los casos ensayados un mayor número de poros grandes en la rizósfera (Whalley 2005).

2.2.3 Exudados

Durante el crecimiento de las raíces son generados de forma activa o pasiva una gran cantidad de compuestos orgánicos denominados “exudados de las raíces”. Entre estos compuestos se encuentran principalmente carbohidratos, ácidos carboxílicos y aminoácidos en diferentes gradientes de concentración (Lynch y Whipps, 1990). Estos compuestos pueden ser agrupados en dos conjuntos: como compuestos que contienen pequeñas cantidades (bajo-M_r) y altas cantidades (alto-M_r) de mucílagos. Entre los bajos-M_r se encuentran los aminoácidos, ácidos orgánicos, azúcares, fenoles y otros metabolitos secundarios; mientras que en los altos-M_r se incluyen los mucílagos (polisacáridos) y las proteínas (Walker *et al.*, 2003). Estos compuestos desempeñan un papel importante en las plantas como atrayentes y repelentes químicos en la rizósfera y su zona de influencia (Estabrook y Yoder, 1998; Bais *et al.*, 2001). Tales compuestos pueden inhibir el crecimiento de otras plantas, absorber iones específicos (Hawes *et al.*, 2000) y regular las comunidades microbianas del suelo proporcionando relaciones simbióticas benéficas para el desarrollo de la planta (por ejemplo, cambiando las propiedades físicas y químicas del suelo) (Nardi *et al.*, 2000).

Los exudados de las raíces de maíz pueden promover la agregación de las partículas del suelo, especialmente para la formación instantánea de microagregados, favoreciendo la actividad microbiana en la rizósfera, creando mayores cantidades de agentes cementantes para la formación de agregados. Morel *et al.*, (1991) demostraron que al incorporar mucílago y mucílago modificado (adicionado con glucosa) en las puntas de las raíces de maíz, aumentó significativamente la estabilidad de los agregados donde se aplicó mucílago a diferencia de donde no se aplicó o se adicionó el mucilago modificado. Independientemente de la actividad de otros microorganismos el cambio se produjo inmediatamente después de la incorporación del mucilago (Figura 4). Sin embargo estos efectos varían con la cantidad de arcillas que contenga el suelo estudiado, por ejemplo la agregación en suelos con 17, 25 y 45% de , la

estabilidad de los agregados duró 14, 30 y 42 días respectivamente (Morel *et al.*, 1991; Traore *et al.*, 2000).

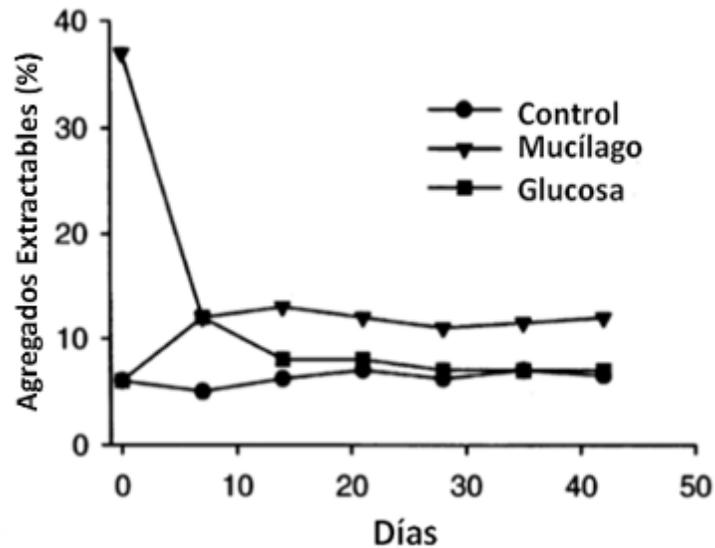


Figura 4. Evolución de agregados estables en agua durante la incubación de glucosa no modificada y mucilago de maíz modificado (Adaptado de Morel *et al.*, 1991).

Varias funciones son atribuidas a los exudados de la cofia de las raíces incluyendo el mantenimiento del contacto entre el suelo y la raíz, la lubricación, la protección ante la desecación de las raíces y la estabilización de los microagregados. Permiten la modulación en los ciclos de humedecimiento y secado, promueven el cambio de los potenciales mátricos y dan ventajas a las raíces para el almacenamiento o drenado del agua según sean las necesidades de la planta (Walker *et al.*, 2003). Todo ello aumenta la capacidad de los exudados para estabilizar la estructura del suelo. Por consecuencia la estabilización de la estructura del suelo alrededor de los sistemas radicales se debe a dos efectos que interactúan, 1) el incremento de las fuerzas de adhesión entre las partículas y 2) la disminución de las tasas de humedecimiento y secado del suelo. El número de ciclos de humedecimiento y secado del suelo serán una determinante en la evolución de la estructura del suelo (Czarnes, *et al.*, 2000).

Sin embargo, el grado de influencia de las raíces sobre la estructura del suelo a través de los exudados es muy variable, debido a que la producción y

composición de los mucilagos depende de: 1) el régimen hídrico (Watt *et al.*, 1994; Czarnes *et al.*, 2000), 2) las especies vegetales (Haynes y Beare, 1997; Hutsch *et al.*, 2002), 3) el tiempo (las mayores producciones se han observado en estadios tempranos (Gransee y Wittenmayer, 2000) y 4) la profundidad del suelo (Merbach *et al.*, 1999)

2.2.4 Entrelazamiento de raíces

Rillig y Mummey (2006), mencionan cinco factores principales en los que las hifas de micorrizas actúan en la formación de agregados (Figura 5):

1. Efecto biológico I. Las hifas influyen en el crecimiento de colonias bacterianas ya que sus exudados junto con el de las raíces, constituyen un sustrato ideal para el crecimiento de dichas colonias.
2. Efecto biológico II. La interacción de las micorrizas con la cadena alimenticia del suelo se vuelve más compleja y los microorganismos ayudan a generar una mejor estructura, de tipo bloques subangulares a migajosa.
3. Efecto bioquímico. Los residuos que liberan las micorrizas (por ejemplo la glomalina) empiezan a interactuar tanto con las colonias bacterianas, como con la materia orgánica, raíces y microagregados para formar estructuras de mayor tamaño.
4. Efecto físico I. Las hifas se entrelazan con partículas y microagregados evitando su expansión (ciclos de secado y humedecimiento)
5. Efecto físico II. Las partículas se alinean y comienzan a ejercer presión a las raíces.

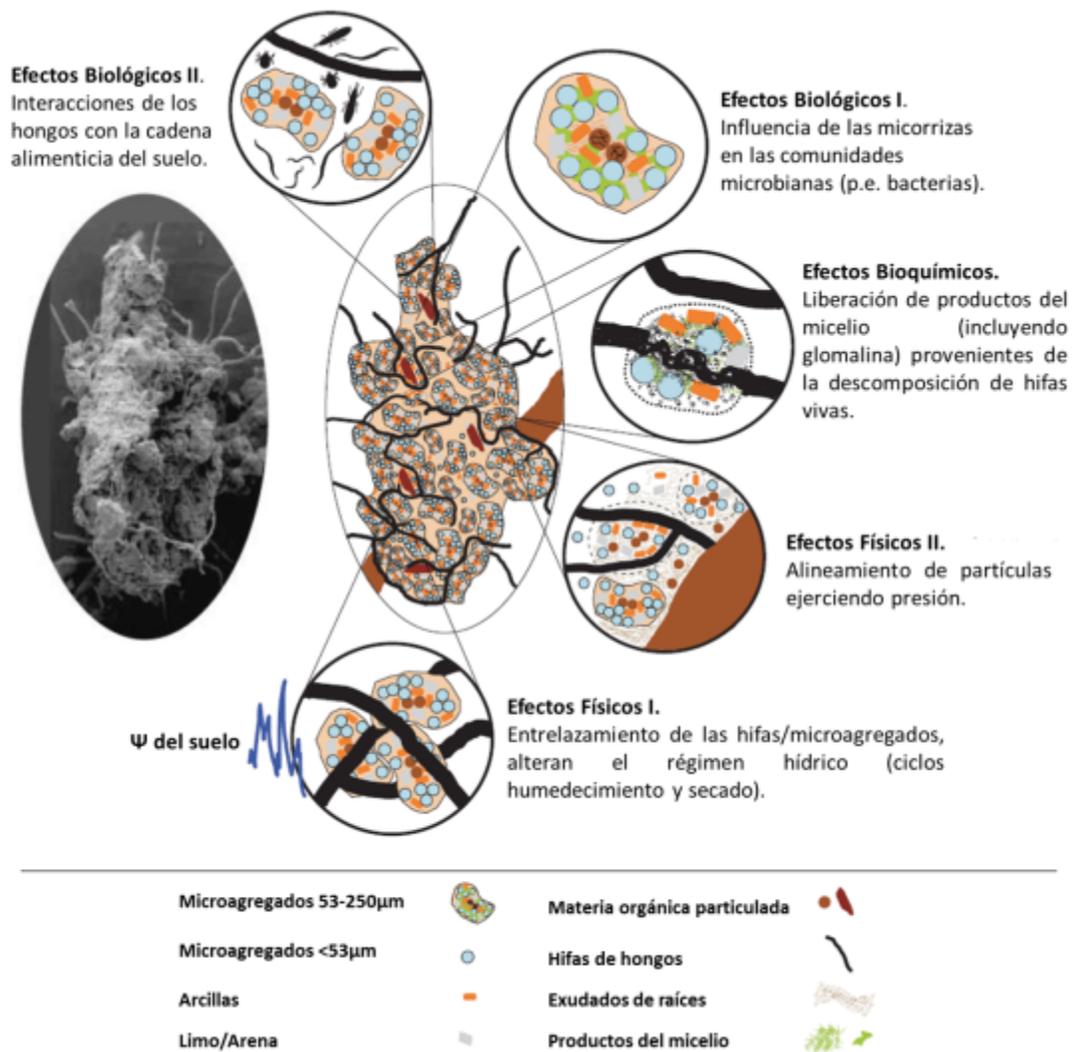


Figura 5. Procesos físicos, biológicos y químicos donde actúan las hifas y su influencia en la estructura y agregación del suelo (Adaptado de Rillig y Mummey, 2006)

2.2.5 Descomposición de raíces muertas

La descomposición de raíces muertas de cultivos anteriores presenta beneficios para la formación y estabilidad de la estructura del suelo. La magnitud de este beneficio puede deberse en gran medida al tipo y cantidad del material vegetal y al manejo agronómico (por ejemplo las prácticas de labranza convencional suelen invertir el suelo, propiciando un cambio en la dinámica de la descomposición de raíces muertas). Gale *et al* (2000a; 2000b) encontraron que un mayor número de agregados estables se formaron durante la senescencia de las raíces en comparación a las que se encuentran en estado vegetativo. En las

leguminosas la agregación es promovida mayormente por las raíces que por el material aéreo. A la cosecha el C almacenado derivado de las raíces alcanza 50%, del C total, mientras que el C proveniente de los brotes aéreos es de sólo el 13%. El C proveniente de la descomposición de las raíces es encontrado como Materia Orgánica Particulada (MOP) ocluida y asociada con las fracciones limo y arcilla. La hipótesis que sustenta el alto aporte de C por las raíces en descomposición parte de tres supuestos 1) la alta capacidad recalcitrante del C de las raíces, 2) protección de la MOP (proveniente de las raíces) dentro de los microagregados y 3) la naturaleza química del C proveniente de los exudados de las raíces (Puget y Drinkwater, 2001).

2.3 Efecto del manejo agronómico sobre el desarrollo radical y la agregación del suelo

La labranza convencional (LC) afecta las propiedades del suelo, dependiendo de la localidad agroclimática y el tiempo en el que se ha llevado a cabo dicha práctica (Rhoton, 2000). La LC causa perturbaciones en el suelo incrementando el riesgo de que éste se erosione. También puede aumentar la resistencia a la penetración de las raíces en el suelo (Cox *et al.*, 1990), rompe la continuidad de los poros (Roseberg y McCoy, 1992; Shipitalo *et al.*, 2000), disminuye la disponibilidad del agua en la totalidad de la parcela y la acumula en la superficie donde no está disponible para las raíces (Cox *et al.*, 1990; Fuentes *et al.*, 2003), afecta la distribución de raíces en el suelo (Dwyer *et al.*, 1995, Qin *et al.*, 2004) y modifica la estructura y estabilidad de los agregados del suelo (principalmente macroagregados) (Six *et al.*, 2002).

Existen antecedentes en Estados Unidos de América desde la década de los años 30 del siglo pasado de la implementación de tecnologías de conservación, que se basan en la reducción ó cero labranza (LZ), promovidas como políticas federales para la recuperación de los suelos agrícolas (Fuglie y Kascak 2001; Baylis *et al.* 2002). En complemento con las técnicas de conservación, surgió la Agricultura de Conservación (AC) que consta de tres principios básicos: 1) mínimo movimiento del suelo, 2) cobertura vegetal permanente (con plantas vivas o residuos de cosechas) y 3) rotación de cultivos. La aplicación correcta de estos principios requiere de cambios en el sistema de producción, incluyendo maquinaria, el manejo de los residuos de la cosecha y el control de plagas (FAO, 2011). La AC puede presentar ventajas en comparación con los sistemas de LC, bajo ciertas condiciones bioclimáticas. Estas ventajas incluyen la reducción del número de veces que pasa la maquinaria sobre una parcela, lo que se ve reflejado en un menor gasto de combustible y menos horas hombre de trabajo (Veseth, 1988; Juergens *et al.*, 2004). En cuanto a los beneficios a corto plazo implementando la AC se tiene que, incrementa el

contenido de agua en el suelo, se elimina la pérdida de agua por escorrentías, evaporación y la erosión del suelo (Hamblin, 1987; Sayre, 1998). Mientras que entre los beneficios a largo plazo se pueden enunciar el aumento en los rendimientos de cultivos (Govaerts *et al.*, 2005), el incremento de la materia orgánica del suelo (MOS), una mayor actividad biológica (Six *et al.*, 2002), porosidad continua y estable que crea mayores puntos de infiltración (Shaxson y Barber, 2003; Thierfelder *et al.*, 2005) y eficiencia en el aprovechamiento de fertilizantes (Hobbs y Gupta, 2004).

Los cambios más significativos provocadas por la LZ sobre las raíces se pueden resumir en: 1) modificación en la distribución espacial de las raíces (Ball-Coelho *et al.*, 1998; Qin *et al.*, 2004; Qin *et al.*, 2005), 2) cambio en la longitud de las raíces (Hilfiker y Lowery, 1988; Holanda *et al.*, 1998, Qin *et al.*, 2004, 2005), 3) alteración en la biomasa radical (Dwyer *et al.*, 1995) y 4) cambios en la formación y estabilidad de los agregados del suelo (Ball-Coelho *et al.*, 1998; Rasse *et al.*, 2000; Lipiec *et al.*, 2006)

2.3.1 Longitud y distribución de raíces

La profundidad que alcanzan las raíces está dada por el tiempo, las especies vegetales, el tipo de labranza y la textura del suelo (Dwyer *et al.*, 1995). Las raíces de las plantas cultivadas en AC, tienden a modificar su distribución vertical y a distribuirse en la capa superficial (0-30 cm) (Newell y Willhem, 1987; Hilfiker y Lowery, 1988; Ball-Coelho *et al.*, 1998; Karutanilake y Schindelbeck, 2000), a diferencia de la LC donde las raíces se localizan a profundidades mayores, como en el caso del maíz y trigo a más de 30 cm (Qin *et al.*, 2004; Qin *et al.*, 2005) y la alfalfa a 140 cm (Rasse *et al.*, 2000); en contraparte al implementar la AC las raíces se distribuyeron mayormente en el horizonte superficial del suelo (0-30 cm). Dwyer *et al.*, (1995) observaron un incremento en la profundidad de las raíces a medida que se aumentaba la labranza. Martínez *et al.* (2008) mencionaron que la zona que presenta mayores modificaciones en cuanto a la distribución de las raíces de trigo cultivado bajo AC, es en los 0-5 cm de

profundidad (donde se presenta el mayor número de raíces). Newell y Wilhelm (1987) mencionaron que la distribución superficial de las raíces de maíz en AC se debe principalmente al descenso de temperatura que produce la cobertura vegetal. Este descenso produce un cambio en la dirección en la que crecen las raíces (haciéndose más horizontal), mientras que en la LC la penetración de las raíces es de mayor magnitud en el perfil del suelo. Por su parte Hilfiker y Lowery (1988), encontraron menor cantidad de raíces en los perfiles superficiales del suelo donde se empleó la LC en comparación con AC, donde las raíces se orientaron mayormente de manera horizontal debido a la humedad y densidad aparente del suelo, esta última al ser mayor en la AC que en la LC lo que promueve el crecimiento de raíces laterales, las cuales a su vez incrementan la continuidad del sistema de poros y la formación de agregados en el suelo (Ball-Coelho *et al.*, 1998).

La densidad radical (longitud de raíces en un volumen de suelo cm cm^{-3} , RLD por sus siglas en inglés. Root Length Density), es uno de los parámetros mayormente empleados para describir la distribución de las raíces. En cultivos que están sujetos a AC los valores de RLD son inconsistentes en varias publicaciones, algunos autores han reportado valores mayores (Hilfiker and Lowery, 1988; Holanda *et al.*, 1998), menores (Barber, 1971; Karutamilake *et al.*, 2000) o similares que con el empleo de la LC (Hughes *et al.*, 1992; Raczkowski, 1989). Sin embargo, la mayoría concuerda en que los factores que modifican los valores de longitud radical (L) y RLD son: la profundidad a la que se realiza la labranza, el estrés hídrico al que esté sometida la planta, el tipo de maquinaria que se emplee para realizar la labranza (Newell y Wilhelm, 1987) y la temperatura que se genere en los estratos superficiales (mayormente de 0-7.5 cm) (Hilfiker y Lowery, 1988; Barber y Kovar, 1991). Otros factores son el contenido de nutrientes, el estadio de desarrollo del cultivo, la textura y el contenido de materia orgánica (Ball-Coelho *et al.*, 1998; Qin *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2010). La longitud radical puede ser relacionada directamente con el espacio poroso capilar y la formación y estabilidad de la estructura del suelo (agregación) (Ball-Coelho *et al.*, 1998; Martínez *et al.*,

2008). La textura del suelo también es causa de la modificación de los valores de RLD (Amato y Richie, 2002). Qin *et al.*, (2004, 2005) mencionaron que para los casos de maíz y trigo la RLD es mayor cuando se utiliza AC, debido a cambios en la distribución de las raíces (mayor RLD estratos superficiales del perfil) y la estratificación de los nutrientes como el fósforo (P), principalmente cuando se reduce la labranza, favoreciendo estos cambios en suelos de textura franco-arcillosa más que en suelos de textura franco arenosa.

2.3.2 Biomasa radical

Existen pocas referencias en cuanto al cambio que producen los tipos de labranza sobre la biomasa radical, pero la mayoría de los autores concuerdan con que la reducción de la labranza y la AC producen una mayor biomasa radical en los horizontes superficiales en comparación con la LC, donde la biomasa radical es mayor en los horizontes más profundos (Sdiras *et al.*, 1999; Ozpinar y Baytekin, 2006). Una excepción es lo reportado por Dwyer *et al.* (1995) quienes concluyeron que la biomasa no era afectada por el tipo de manejo, aunque en la AC tendía a concentrarse en los estratos superficiales, pero sin presentar diferencias significativas. Otro aspecto que afecta la biomasa radical es el estado fisiológico en que se encuentren las plantas y la textura del suelo, encontrándose una mayor cantidad en suelos con textura franco-arcillosa que en suelos con textura franco-arenosa, debido a la presencia de una capa gruesa de arena que se forma y que impide la penetración de las raíces (Nicoullaud *et al.*, 1994). En la mayoría de los casos las concentraciones más altas de biomasa radical en los estratos superiores del perfil del suelo, se deben al manejo con AC en comparación con la LC y que reduce la capacidad exploratoria de las raíces (Raczkowski, 1989; Cox *et al.*, 1990).

2.3.3 Cambios en la formación y estabilidad de los agregados del suelo

Las raíces son uno de los principales factores que determinan la formación y estabilidad de los agregados del suelo. Las prácticas de labranza alteran el

desarrollo de las plantas, éstas a su vez desarrollan sistemas radicales que promueven cambios en la distribución de los agregados. Según Lipiec *et al.*, (2006) y Martínez *et al.*, (2008) se provoca un aumento en la estabilidad de los microagregados en los horizontes superficiales cuando se maneja el sistema AC en comparación con las prácticas de LC. Esto se debe al aumento en la densidad aparente y disminución de la macroporosidad del suelo, que inducen un desarrollo lateral de las raíces, incrementando la estabilidad en húmedo y seco de los agregados en los horizontes superficiales. Las raíces son menos propensas a crecer a través de agregados estables y son desviadas en su camino gravitrópico de crecimiento (Ball-Coelho *et al.*, 1998). Por ello la mayoría de agregados estables se localizan en la superficie del suelo, debido al aporte de carbono orgánico del suelo (COS) por parte del mantillo vegetal de los restos de cosechas anteriores y por la gran cantidad de raíces en descomposición que mejoran la formación de agregados. (Acharya y Sharma, 1994; Merrill *et al.*, 1996; Rasse *et al.*, 2000; Ghuman y Sur, 2001; Shukla *et al.*, 2003; Martínez *et al.*, 2008).

Miller y Jastrow (1990) trataron de aislar el efecto de las raíces sobre la agregación empleando un análisis de estadística multivariada (Path Analysis), tomando en cuenta de qué manera repercuten diferentes factores sobre el diámetro promedio de los agregados. Estos autores encontraron que las raíces finas (0.2-1.0 mm) y las raíces muy finas (< 0.2 mm) junto con las micorrizas arbusculares resultaban ser los primeros promotores de la agregación. Más adelante Jastrow *et al.* (1998) generarían un modelo similar (Figura 6) en el que esta vez considerarían el porcentaje total de macroagregados que se forman. El resultado de este trabajo fue una menor magnitud de la participación de las raíces sobre la agregación en suelos franco-arenosos y que la agregación era el resultado de una compleja interacción entre agentes cementantes en un gradiente espacio-temporal.

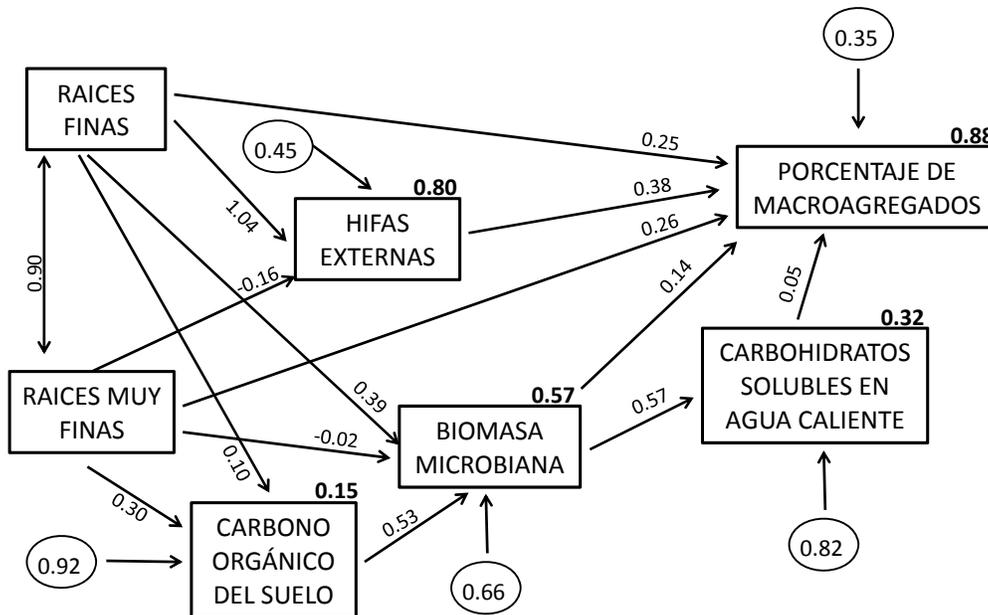


Figura 6. Modelo hipotético de las relaciones causales entre las raíces, hifas de micorrizas y tres sumideros de carbono. Los encabezados de una flecha significan una relación causal directa, dos puntas indican las correlaciones analizadas. Los números son coeficientes de cambio, la varianza total explicada (negritas) y en elipses la varianza no explicada. Adaptado de Jastrow *et al.* (1998).

Los mecanismos involucrados en la formación de agregados donde predominan las partículas de arena son: 1) la adhesión por los pelos radicales (rizocorazas, rizoheaths en inglés) y 2) la alta densidad de raíces que disminuye la porosidad del suelo y provoca la formación de agregados. Las raíces finas (< 3 mm) fueron relacionadas tempranamente con la formación de agregados, ya que éstas se encontraron localizadas dentro de esas estructuras fungiendo como sostén (De León-González *et al.*, 2007) (Figura 7). Pero en suelos con mayor cantidad de arcillas los mecanismos operan de manera contraria. Fuentes *et al.* (2011), describieron que en cultivos donde se practica la AC y se cultiva trigo-maíz en ese orden de rotación, el trigo beneficia al cultivo de maíz, aumentando la porosidad, mientras que cuando en la rotación se siembra primero maíz y luego trigo, éste reduce la porosidad y el crecimiento de las raíces de trigo. Además el monocultivo de trigo (sembrado en LZ y quitando los residuos) no puede mejorar la estructura, ya que no aporta suficiente materia orgánica para poder generar agregados estables (Fuentes *et al.*, 2011).

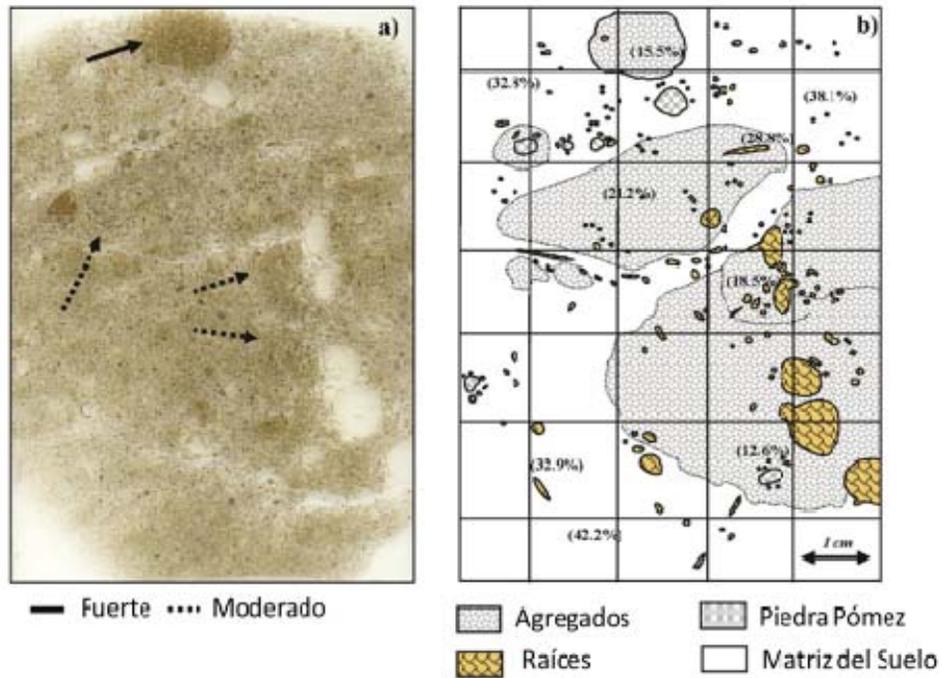


Figura 7. Distribución espacial de las raíces y los agregados en diferentes grados de desarrollo pedogenético. a) Sección delgada vertical (girasol 0-7 cm, centrada en la raíz) y b) mapa de raíces y agregados y su relación con la porosidad del suelo (en paréntesis). Adaptado de De León-González *et al.*, (2007).

3. OBJETIVO E HIPÓTESIS.

3.1 Objetivo general.

Caracterizar el tamaño, densidad y biomasa radical de cebada (*Hordeum vulgare* L.) y maíz (*Zea mays* L.); y establecer la relación de éstos parámetros con la formación de agregados en un suelo sometido a diferentes manejos agronómicos.

3.1.1 Objetivos Particulares

- Evaluar el desarrollo radical de maíz y cebada en los diferentes tratamientos, por medio de los parámetros de densidad (RLD), área superficial (AS) y diámetro promedio (DP) de las raíces.
- Cuantificar la biomasa radical y aérea de las plantas de maíz y cebada en los diferentes tratamientos.
- Cuantificar la distribución y estabilidad de los agregados del suelo en cada tratamiento.
- Correlacionar los parámetros morfométricos de las raíces con los parámetros de distribución y estabilidad de los agregados del suelo.

3.2 Hipótesis general.

- El sistema radical de las plantas de cebada bajo Agricultura de Conservación, promueve una distribución homogénea de los agregados del suelo que el sistema radical del maíz, indistintamente del tratamiento en que se haya desarrollado.

3.2.1 Hipótesis Particulares

- Los sistemas radicales de mayor densidad se localizan en los tratamientos de maíz con cero labranza y remoción de residuos por la poca disponibilidad de nutrientes.
- Las menores cantidades de biomasa se producen en el tratamiento con maíz, cero labranza y remoción de residuos, debido a que la estructura física del suelo no permite el adecuado desarrollo de las raíces y la parte aérea de las plantas.
- Los tratamientos donde se cultiva cebada bajo Agricultura de Conservación, consiguen una distribución homogénea con respecto a los tratamientos donde se practique la labranza convencional.
- Los parámetros morfométricos de las raíces de cebada se correlacionarán con parámetros de agregación a diferencia de los parámetros morfométricos de las raíces de maíz.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la Estación Experimental El Batán del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) ubicada a 19° 31' N y 98° 50' W, a 2259 msnm en los valles altos de México, en un suelo *Haplic Phaeozem* arcilloso (IUSS, Working Group WRB, 2006), con la siguiente distribución granulométrica: arcilla (<2 µm) 38%, limo (50–2 µm) 37% y arenas medias-finas (1000–50 µm) 25% (Fuentes, 2005). El clima es semiárido (temperatura media mensual entre 12.5-17.5 °C), con una pluviometría superior a 500 mm por año (la cual ha sido superada en todos los años por la evapotranspiración), que ocurre principalmente durante los meses de verano. El experimento se ha llevado a cabo bajo condiciones de temporal. La precipitación de los años 2010 y 2011 se muestra en la Figura 8.

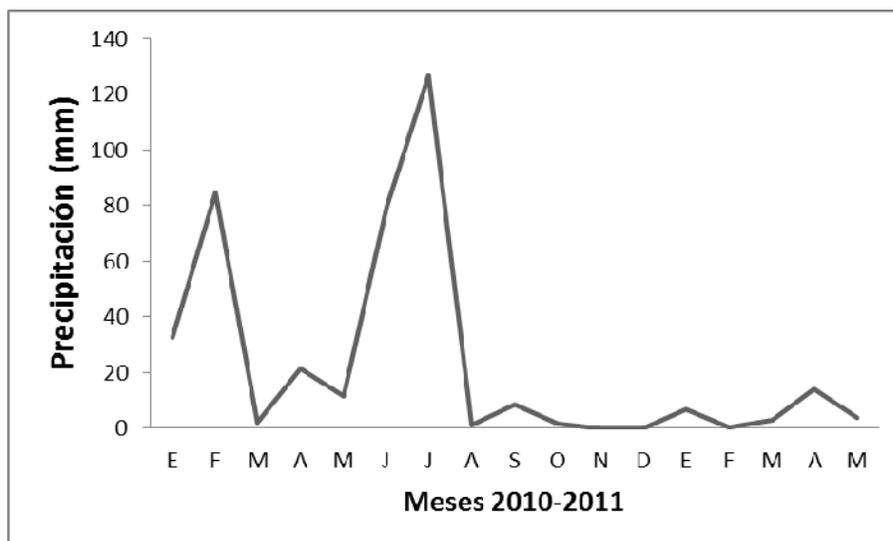


Figura 8. Precipitación en los años 2010 (Enero-Diciembre) y 2011 (solo de Enero-Mayo), en la estación experimental del Batán (CIMMYT), Texcoco. Datos de la estación meteorológica CIMMYT.

El experimento en el cual se trabajó se estableció en 1991. En un área de 1.3 ha y está compuesto por 64 parcelas de 7.5 x 22 m cada una, con una pendiente de 0.03 % (dirección norte-este). El experimento original consta de 32 tratamientos con dos réplicas cada uno. Algunos de estos tratamientos fueron modificados a lo largo de los años, pero un conjunto de 16 tratamientos se han

mantenido sin cambios desde el comienzo del experimento. A estos tratamientos se les llama conjunto básico. Los tratamientos del conjunto básico constan de la combinación de labranza cero (LZ), labranza convencional (LC); con residuos de cosecha (+r) y sin residuos de cosecha (-r), así como monocultivo de maíz (*Zea mays*) (MM) con una densidad de siembra de 60000 plantas ha⁻¹ o trigo (*Triticum aestivum*) a una densidad de siembra de 100 kg ha⁻¹ o en rotación con maíz-trigo o trigo-maíz, todos ellos organizados en un diseño experimental de bloques completamente al azar. En el año en que se realizó el muestreo de raíces (2010) no se cultivó trigo sino cebada (*Hordeum vulgare* L.) en monocultivo (CC) a una densidad de siembra de 100 kg ha⁻¹ (aproximadamente 1600000 plantas ha⁻¹ según Gutormson, 2002). Quedando las rotaciones como maíz-cebada (MC) y cebada-maíz (CM). Los tratamientos muestreados para el presente experimento fueron los siguiente (Figura 9):

- 1) LC+rMM. Labranza convencional, con residuos y monocultivo de maíz (25, 33)*.
- 2) LC-rMM. Labranza convencional, sin residuos y monocultivo de maíz (29,51).
- 3) LC+rCC. Labranza convencional, con residuos y monocultivo de cebada (31,53).
- 4) LC-rCC. Labranza convencional, sin residuos y monocultivo de cebada (9, 37).
- 5) LZ+rMM. Labranza cero, con residuos y monocultivo de maíz (23, 42).
- 6) LZ-rMM. Labranza cero, sin residuos y monocultivo de maíz (3,64).
- 7) LZ+rCC. Labranza cero, con residuos y monocultivo de cebada (21, 47).
- 8) LZ-rCC. Labranza cero, sin residuos y monocultivo de trigo (19, 46).
- 9) LZ+rCM. Labranza cero, con residuos y rotación trigo-maíz (18, 59).
- 10) LZ+rMC. Labranza cero, con residuos y rotación maíz-trigo (28,49).

*Los números entre paréntesis representan el número de parcela de los diferentes tratamientos del Experimento de Larga Duración en el Batán, Texcoco.



Figura 9. Vista aérea del Experimento a largo plazo en El Batán, Texcoco. Las parcelas enmarcadas con color y el número representan el número y localización de las parcelas empleadas en esta investigación.

La labranza convencional consistió en una aradura, con un disco a 20 cm de profundidad (dos pasadas) y una rastra escarificadora para terminar la cama de semilla, posteriormente se sembró. Las parcelas con LZ se sembraron directamente sin preparar el terreno, empleando una sembradora Almaco[®] en el caso de maíz y Aitcheson[®] para cebada. En los tratamientos con residuos se retuvieron todos los del cultivo anterior, dejándose sobre la superficie (+r) o removiéndolos (-r), dependiendo del sistema de labranza de que se trató. La remoción de residuos aéreos se realizó con rastrillo.

4.1 Mediciones morfométricas de las raíces

Dos plantas de cada parcela fueron extraídas el 28 de Septiembre de 2010 en la etapa de madurez fisiológica R6 en el caso del maíz según Ritchie y Hanway (1984) y etapa 9 en el caso de la cebada, según Zadoks *et al.* (1974). Se extrajo un monolito de suelo de 0.2 x 0.2 x 0.2 m que incluía la parte aérea. Los monolitos

fueron sacudidos en el terreno para remover el exceso de partículas de suelo y sólo dejar el suelo adherido a la raíz. Una vez en el laboratorio las raíces fueron separadas de la parte aérea de la planta. Se procedió a su limpieza en agua, realizando movimientos circulares y removiendo manualmente los pequeños agregados que aún quedaban adheridos a las raíces. El agua del recipiente se cambió dos veces hasta que no se observó la presencia de restos de sedimento edáfico. Una vez limpias las raíces se colocaron en alcohol etílico al 70% y se refrigeraron a 5 °C para su preservación. Fueron retiradas del alcohol donde se almacenaron y se digitalizaron con un escáner convencional Hewlett-Packard® a 300 puntos por pulgada (dpi) para obtener sus imágenes. Las raíces se distribuyeron manualmente lo más uniforme posible sobre el vidrio del escáner, minimizando la superposición de las mismas sobre el escáner para capturar el máximo posible de ellas. Con las imágenes digitalizadas se obtuvieron las variables morfológicas de densidad radical (RLD), diámetro promedio (DP) y área superficial (AS) mediante el software desarrollado para analizar raíces WhinRizo® (Regent Instruments, 2008) (Figura 10).



Figura 10. Monolito con la raíz y parte aérea.

Posterior a las mediciones morfométricas de las raíces, la parte aérea y las raíces fueron secadas en un horno a 80 °C durante 48 horas (Figura 11). Al término de este lapso fueron pesadas ambas fracciones de la totalidad de los tratamientos para obtener la biomasa aérea (BA), la biomasa radical (BR) y calcular la relación BR/BA.



Figura 11. Raíces después de ser secadas. Cebada (izquierda) y maíz (derecha)

4.2 Determinación de agregados en húmedo

Se colectaron muestras inalteradas de 500 g de suelo de cada tratamiento el 29 de Junio de 2010, con ayuda de una pala a una profundidad de 0.2 m. Las muestras fueron secadas al aire y tamizadas con una malla de 8 mm, de las cuales se tomaron 15 g (dos repeticiones), se colocaron en charolas donde se les adicionó agua destilada y se dejaron reposar por 20 minutos. Posteriormente el suelo se tamizó en una columna de mallas con aperturas de 4.75, 2.00, 1.00, 0.50, 0.25 y 0.05 mm. La columna se sumergió en un cilindro con agua destilada, a un movimiento vertical con una velocidad de 60 rpm y se retiró del agua (Figura 12). La fracción del suelo retenida en cada uno de los tamices se secó en una estufa a 105 °C durante 18 horas y se pesó.



Figura 12. Columna empleada para tamizar los agregados en húmedo

Para determinar la cantidad de agregados fue necesario realizar una corrección por contenido de partículas de arena. Para ello se dispersaron los agregados, después de adicionar a cada una de las fracciones separadas una solución de hexametáfosfato de sodio (HMP) 0.5 % (30 ml por cada 100 g de suelo) y se agitaron durante 12 horas. Cada fracción se pasó por el tamiz que le correspondía, de esta manera se recuperó el material que no era parte de los agregados, restándola a la fracción primaria.

A partir del cálculo anterior se determinaron los porcentajes de agregados de diferentes tamaños < 0.25 mm (microagregados), 0.25-1.00 mm (mesoagregados) y 1.0-8.0 mm (macroagregados). Se calculó el diámetro medio ponderado (DMP) por muestra (Barthés *et al.*, 2000; Kemper y Rosenau, 1986).

4.3 Análisis estadístico

Los resultados de microagregados, mesoagregados, macroagregados, DMP y las variables morfológicas de las raíces (Densidad radical, RLD; Diámetro Promedio, DP; Área superficial, AS; Biomasa radical, BR y Relación Biomasa radical/aérea BR/BA), fueron sometidos a un análisis de varianza (ANDEVA) de una vía empleando un modelo completamente aleatorizado con un valor de $P=0.05$, con ayuda del software estadístico SigmaPlot® v12.0 (Systat Software, Inc. 2011) En aquellos ANDEVA donde se mostraron diferencias significativas (valores de $P<0.05$) entre los tratamientos, se procedió a realizar una prueba de Diferencias Mínimas Significativas (DMS) con un $P=0.05$.

Las variables morfológicas de cebada y maíz RLD, AS, DP, BA, BR y BR/BA se ajustaron a una regresión polinomial con el diámetro medio ponderado (DPM) de los agregados, el porcentaje de microagregados (% MI), mesoagregados (% ME) y macroagregados (% MA).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Mediciones morfométricas de las raíces

5.1.1 Densidad, área superficial y diámetro promedio de las raíces

La densidad radical (RLD) y área superficial (AS) de las raíces de maíz y cebada presentaron diferencias significativas entre tratamientos, mientras que el diámetro promedio (DP) de las raíces resultó ser similar en todos los tratamientos. (Cuadro 1).

Cuadro 1. Probabilidad de error (P) de las variables morfométricas densidad radical, diámetro promedio y área superficial de las raíces de cultivos de maíz y cebada obtenidas a 0-20 cm de profundidad de los diferentes tratamientos.

Parámetro	Valor P
Densidad radical	<0.001**
Área superficial	<0.001**
Diámetro promedio	0.090NS

**Muy significativo ($P<0.01$). *Significativo ($P<0.05$). NS no significativo.

Los parámetros RLD y AS mostraron una correlación directa entre ellos (Figura 13), estas variables están relacionadas con la absorción de nutrientes para la planta. Se observaron mayores valores de RLD y AS en donde se encontraron bajas concentraciones de nutrientes (Fitter 2002). Las diferencias entre estos parámetros se encontraron sólo en relación a las plantas que se cultivaron, obteniendo diferencias estadísticas significativas para maíz, mientras que los tratamientos donde se cultivo cebada fueron similares estadísticamente. En el presente estudio la fertilización de las parcelas fue homogénea (150 kg ha^{-1} de N) y no fue en función de los requerimientos de los cultivos. La demanda de nutrientes de los cultivos de grano pequeño (trigo y cebada) es menor (190 kg ha^{-1} de N) a diferencia del cultivo de maíz (300 kg ha^{-1} de N). Por la razón anterior en los tratamientos donde se cultivó maíz se pudo presentar un mayor déficit nutrimental, que se vio reflejado en el aumento de su RLD y AS en comparación a condiciones óptimas de fertilización (Volke *et al.*, 1998; Otegui *et al.*, 2002;

Rodríguez, 2001). Con respecto a los tratamientos de cebada no se observaron cambios en su RLD y AS en comparación a su crecimiento normal.

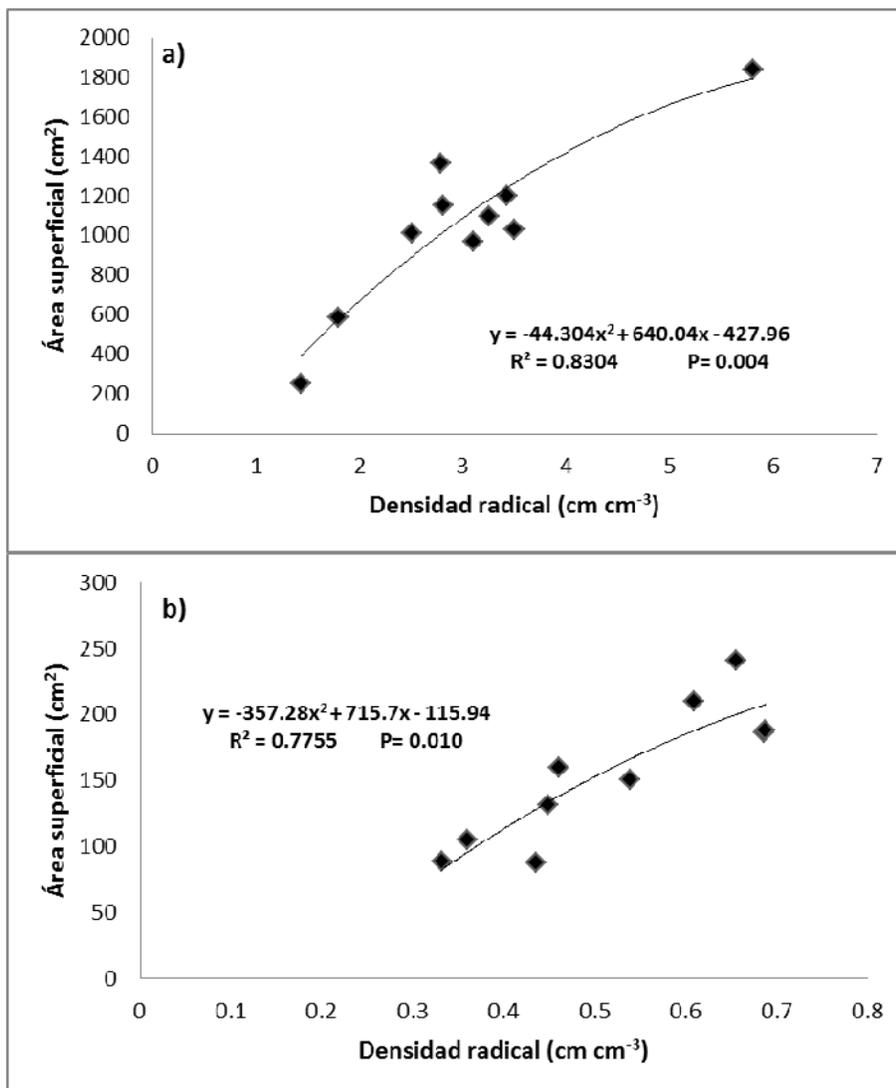


Figura 13. Correlación de la densidad radical (RLD) con el área superficial (AS) de las raíces de maíz (a) y cebada (b) en los diferentes tratamientos.

Las plantas de maíz con mayor RLD se presentaron en las parcelas manejadas con LC-rMM, LC+rMM y LZ+rMM LZ+rMC, 4.45, 3.33, 3.14 y 2.65 cm cm⁻³ respectivamente. Los valores mayores de AS en plantas de maíz se encontraron en las plantas cultivadas en los tratamientos LC-rMM (1404 cm²), LZ+rMM (1120 cm²), LC+rMM (1148 cm²) y LZ+rMC (1082 cm²) (Figura 14). Las raíces alcanzaron mayores densidades en suelos con bajas concentraciones de nutrientes disponibles o que éstos últimos se encontraron en parches a diferentes

profundidades del perfil del suelo (Christie y Moorby, 1975; Fitter, 1985; Qin *et al.*, 2005). Indistintamente del tipo de manejo agronómico que se empleó, las plantas de cebada presentaron valores similares de RLD y AS, debido a que la fertilización no se realizó en función de los requerimientos nutrimentales de las plantas, sino porque el diseño experimental ofrece condiciones experimentales iguales a ambos cultivos (cebada y maíz), por lo que las plantas de cebada no presentaron un déficit nutrimental a diferencia de las del maíz.

Para las plantas de maíz en los casos donde se empleó la LC se observaron valores ligeramente mayores de RLD y AS que donde se implementó la LZ, ya que los nutrientes suelen encontrarse en capas más profundas en suelos donde se aplica la LC. En los suelos con labranza convencional el P se encuentra en capas más profundas del perfil del suelo, por el proceso de inversión, quedando menos disponible para las raíces, a diferencia de la LZ en donde el P se mantiene en la capa arable (0-15 cm) (Tracy *et al.*, 1990, Weil *et al.*, 1988; Govaerts *et al.*, 2006). En consecuencia las raíces de las plantas de maíz en LC se elongaron, rompiendo agregados y produjeron ramificaciones (raíces finas encargadas de maximizar la absorción de nutrientes) sólo en las capas con una mayor acumulación de nutrientes (Dinkelaker *et al.*, 1989; Qin *et al.*, 2005; Kumar y Dey, 2011), aumentando su RLD y AS. Mientras que en las plantas de maíz bajo Agricultura de Conservación, la RLD y AS de las raíces fue ligeramente menor, ya que éstas realizaron una menor exploración del suelo debido a las mejores condiciones nutrimentales que presenta éste manejo agronómico (Qin *et al.*, 2005). Produciendo un mayor número de raíces finas en comparación con la LC.

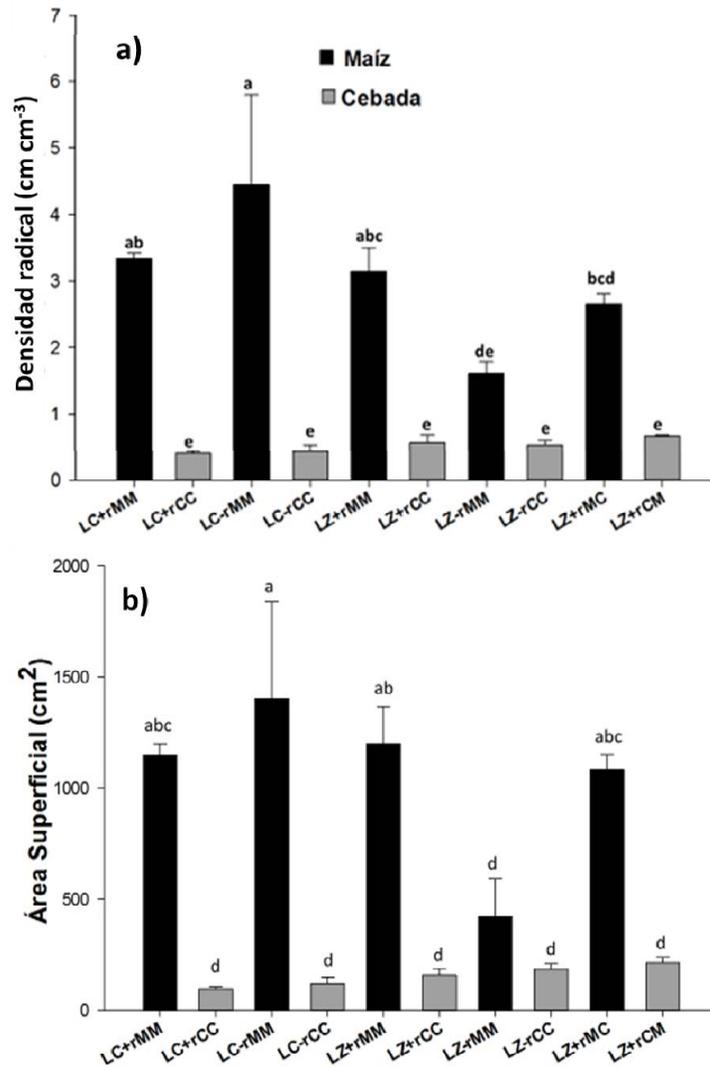


Figura 14. (a) Densidad (RLD) y (b) área superficial (AS) de las raíces de maíz y cebada de 0-20 cm de profundidad en parcelas con Labranza cero (LZ), Labranza convencional (LC), monocultivo de Maíz (MM), monocultivo de cebada (CC), rotación maíz-cebada (MC), rotación cebada-maíz (CM), sin residuos (-r) y con residuos (+r). Líneas en las barras corresponden al error estándar. Letras diferentes muestran tratamientos con diferencias significativas. Coeficiente de variación RLD= 115 % y AS= 111 % de AS.

El único tratamiento que fue diferente LZ-rMM a todos los tratamientos donde se cultivo maíz (figura 14), resultó ser similar a los tratamientos donde se empleó cebada. Esto no implica que haya tenido condiciones de mayor disponibilidad de nutrientes como en las parcelas donde se cultivo cebada, sino que en las mismas parcelas utilizadas en esta investigación, Govaerts *et al.* (2006) y Fuentes *et al.*, (2009), reportaron que LZ-rMM tiene una menor calidad nutrimental que los demás tratamientos. El suelo de esta parcela presentó una

resistencia a la penetración > 3 Mpa (Fuentes *et al.*, 2009), la cual puede impedir la elongación de las raíces en el perfil del suelo (Materechera *et al.*, 1992), además la concentración de fertilizante (acumulación debida a la compactación del suelo y el escaso drenaje) en la capa superficial del suelo promueve su acidificación (Fuentes, 2005; Fuentes *et al.*, 2009).

El sistema radical de la cebada no mostró diferencias significativas de AS y RLD entre los diferentes tratamientos, posiblemente debido a la disponibilidad de suficiente fertilizante lo que no afectó el crecimiento de las raíces. El adecuado desarrollo del sistema radical propició mejores características estructurales del suelo lo que generó un mayor número de puntos de infiltración (Govaerts *et al.*, 2006), idónea distribución de poros y mayor accesibilidad de nutrientes (Fuentes *et al.*, 2009; Fuentes *et al.*, 2011) en comparación a los sistemas radicales de maíz, sin importar el manejo agronómico al que fueron sometidas las plantas de cebada. En contraposición algunos autores han reportado mayores RLD y AS en la profundidad de 0-30 cm en trigo (Abdoul *et al.*, 1997) y cebada (Lampurlanés *et al.*, 2001; Lampurlanés *et al.*, 2002; Martínez *et al.*, 2008) cuando se practica la AC en comparación con LC, argumentando una mayor disponibilidad de agua (Abdoul *et al.*, 1997; Lampurlanés *et al.*, 2001; Lampurlanés *et al.*, 2002) y mejores características estructurales del suelo (Martínez *et al.*, 2008) en AC.

El rango del diámetro promedio (DP) de las raíces del maíz fue de 2.2 hasta 4.8 mm y para cebada de 2.6 a 6.0 mm, en ninguno de los dos cultivos se detectaron diferencias significativas entre el DP de los sistemas radicales en los diferentes tratamientos (Figura 15). El DP de las plantas se relaciona con la densidad del sistema radical. Se ha reportado que existe un mayor número de raíces finas cuando las plantas crecen con un bajo suministro de nutrientes (Christie y Moorby, 1975; Fitter, 2002). Al igual que la RLD y AS se puede atribuir a que la fertilización de las parcelas donde se cultivaron las plantas de cebada fue suficiente para el desarrollo de las raíces, por lo cual el DP no mostró diferencias significativas. Resultados similares han sido reportados para plantas de trigo

(Pearson *et al.*, 1991; Qin *et al.*, 2004). Sin embargo se han reportado valores mayores de DP en LZ con respecto a LC (Muñoz-Romero *et al.*, 2011) argumentando que se genera una mayor resistencia mecánica en LZ que en LC, lo que provoca que aumente el diámetro de las raíces (Chassot y Richner, 2002). En contraste Sidiras *et al.*, (2001) mencionaron que en cultivos de cebada el DP es mayor en LC que en LZ, ya que se ejerce mayor presión radial en contra de las raíces de LZ que las de LC.

En los tratamientos donde se empleó maíz tampoco se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos donde se cultivo esta planta. (Figura 15). Suponemos que la deficiencia de nutrientes impactó mayormente en parámetros de RLD y AS y no en el diámetro promedio. Aunque en el tratamiento LZ-rMM —que se había mencionado como el de menor calidad nutrimental y mayor resistencia a la penetración (Govaerts *et al.*, 2006; Fuentes *et al.*, 2009) — se alcanzó a percibir la reducción del DP, atribuida probablemente a la reducción del gasto metabólico, por efecto del déficit nutrimental. Las raíces del maíz modificaron sus tejidos celulares (aumentando principalmente los espacios intercelulares, aerénquima) (Fan *et al.*, 2003; Lynch, 2007) por efecto de la deficiencia de nutrientes como: nitrato (Ryser y Lambers, 1995) y fósforo (Xie y Yu 2003; Zhu and Lynch 2004). Al decrecer el DP de las raíces la RLD aumentó. Pero el análisis de varianza no contó con el poder estadístico para detectar las diferencias estadísticas entre los tratamientos de maíz.

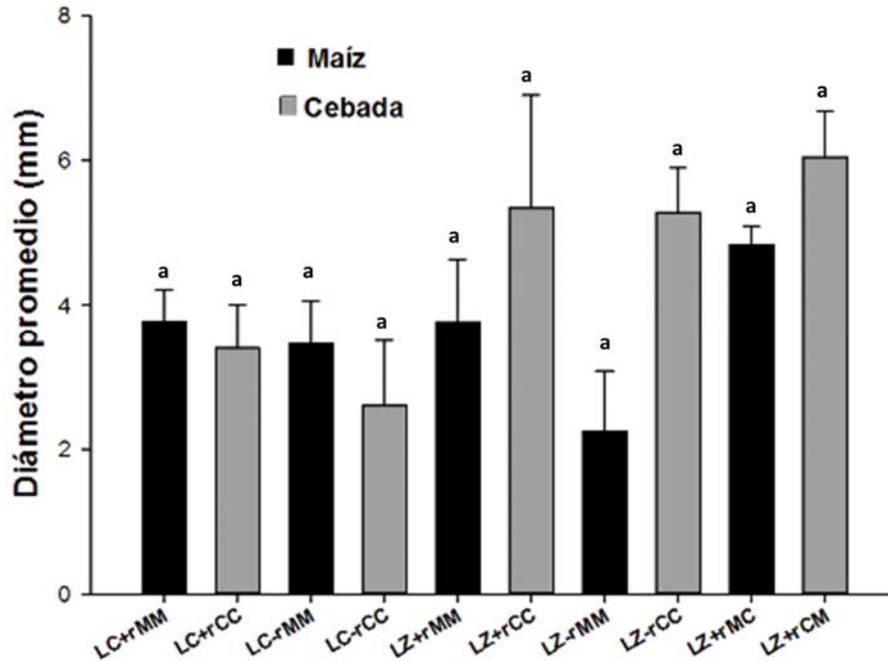


Figura 15. Diámetro Promedio de las raíces de maíz y cebada 0-20 cm de profundidad de los diferentes tratamientos. Labranza cero (LZ), Labranza convencional (LC), monocultivo de Maíz (MM), monocultivo de cebada (CC), rotación maíz-cebada (MC), rotación cebada-maíz (CM), sin residuos (-r) y con residuos (+r). Líneas en las barras corresponden al error estándar. Letras diferentes demuestran tratamientos con diferencias significativas. Coeficiente de variación DP=276%.

Los coeficientes de variación (CV) de RLD (115%), DP (276%) y AS (111%) se situaron en un rango similar otros estudios. Lampurlanés y Cantero-Martínez, (2003) reportan que habitualmente los CV en este tipo de estudios se ubican entre 100 y 200%. Valores tan elevados se deben principalmente al tipo de muestreo que se realiza en este tipo de investigaciones. En nuestro caso, a pesar de que los monolitos y las raíces se procesaron y lavaron con sumo cuidado, existieron pérdidas de material vegetal sobre todo de raíces muy finas. Se recomienda trabajar con un mayor número de repeticiones por parcela para decrecer los CV.

5.1.2 Biomasa aérea, radical y relación biomasa radical/aérea

La biomasa aérea (BA) y biomasa radical (BR) presentaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($P < 0.05$), mientras que la relación de estos dos parámetros (BR/BA) mostró ser igual estadísticamente en todos los tratamientos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Probabilidad de error (*P*) de las variables biomasa aérea, biomasa radical y relación BR/BA de los cultivos de maíz y cebada a 0-20 cm de profundidad de los diferentes tratamientos.

Parámetro	Valor <i>P</i>
Biomasa aérea	0.025*
Biomasa radical	0.046*
Relación biomasa radical/aérea	0.542 ^{NS}

**Muy significativo ($P < 0.01$). *Significativo ($P < 0.05$). NS no significativo.

Las plantas de maíz presentaron la menor BA (0.69 a 1.55 kg m⁻²) en comparación con las plantas de cebada (4.27 a 6.27 kg m⁻²) y sus medias fueron similares estadísticamente (Figura 16).

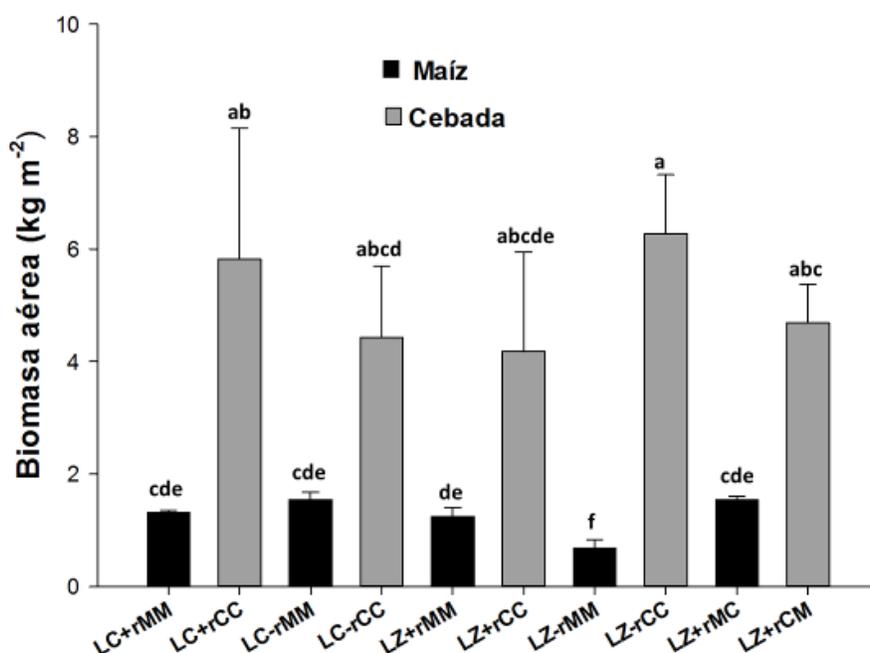


Figura 16. Biomasa aérea (BA) de las plantas de maíz y cebada de los tratamientos a una profundidad de 0-20 cm. Líneas en las barras corresponden al error estándar. Labranza cero (LZ), Labranza convencional (LC), monocultivo de Maíz (MM), monocultivo de cebada (CC), rotación maíz-cebada (MC), rotación cebada-maíz (CM), sin residuos (-r) y con residuos (+r). Letras diferentes demuestran tratamientos con diferencias significativas. Coeficiente de variación BA= 151%

La menor BA se midió en los cultivos de maíz en el tratamiento LZ-rMM que fue el único diferente al resto. Este tratamiento registró en los parámetros RLD, AS, DP, BA y BR los valores más bajos debido a la estructura compacta del suelo y mayor degradación que los suelos con las prácticas agronómicas convencionales del valle de México (monocultivo de maíz, sin residuos y labranza

convencional). Estos resultados son consistentes con lo reportado en el mismo experimento Govaerts *et al.*, (2005) reportaron que LZ-rMM obtuvo los rendimientos más bajos de maíz entre los años 1997-2002, lo que se atribuye al retiro los residuos de cosecha. Esto propició poca retención y disponibilidad de agua, se generó un sistema de poros ineficientes y una estructura compactada (hasta 3 Mpa de resistencia a la penetración). En consecuencia el crecimiento de las raíces de las plantas de maíz bajo este tratamiento se vio afectado (Materechera *et al.*, 1992) y pudo impedir la adquisición adecuada de nutrientes para el desarrollo de la parte aérea de las plantas.

La biomasa aérea de las plantas de cebada de los diferentes tratamientos no mostró diferencias significativas, similar a la tendencia de los valores de RLD y AS. La similitud en la biomasa aérea de cebada se explica por la disponibilidad de nutrientes en todos los tratamientos por la aplicación de dosis suficientes de fertilizante aun cuando las condiciones de manejo agronómico no fueron las ideales. Los sistemas radicales de las plantas de cebada pudieron contribuir a la generación de condiciones físicas benéficas en el suelo para el crecimiento de las raíces (Fuentes *et al.*, 2009; Fuentes *et al.*, 2011) y por ende para la obtención de nutrientes, por lo que los diferentes manejos agronómicos no influyeron de manera directa en el desarrollo de la biomasa aérea de las plantas. Esta aseveración esta sustentada en la hipótesis de que los nutrientes se encuentran mayormente disponibles si se registran valores menores de RLD y AS (Christie y Moorby, 1975; Fitter, 1985), como es el caso de todos los tratamientos donde se cultivó cebada en comparación con el maíz.

La biomasa radical (BR) presentó la misma tendencia que la BA, los mayores valores de BR se presentaron en las plantas de cebada (0.25 a 0.59 kg m⁻²) en comparación con las de maíz (0.6 a 0.10 kg m⁻²) (Figura 17). Yamagishi *et al.* (2003) reportaron resultados similares, afirmando que la BR en cebada y maíz fue mayor al aplicar LZ, excepto en los años 1999 y 2000 donde la BR de cebada fue mayor que la del maíz.

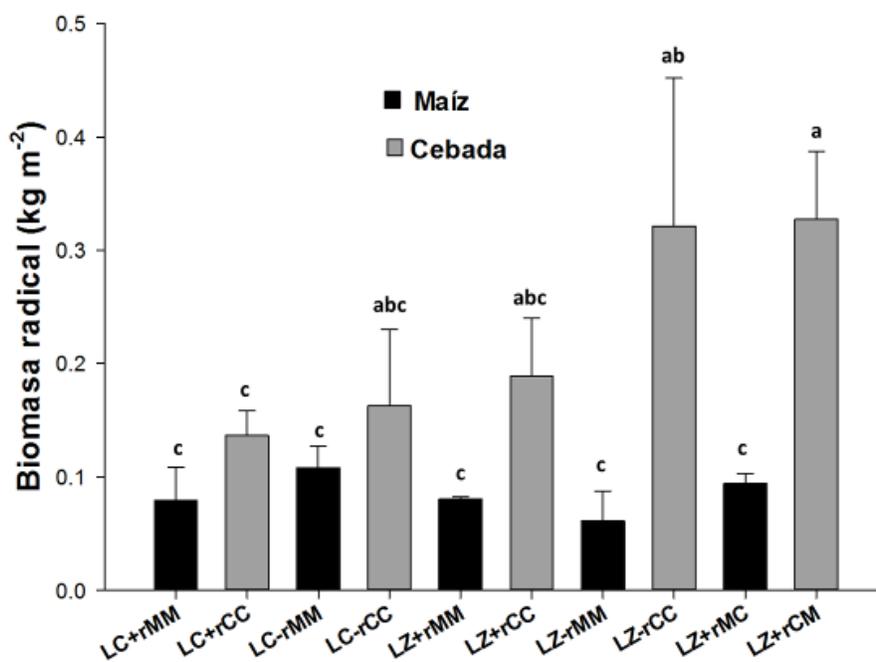


Figura 17. Biomasa radical de las plantas de maíz y cebada 0-20 cm de profundidad de los diferentes tratamientos. Labranza cero (LZ), Labranza convencional (LC), monocultivo de Maíz (MM), monocultivo de cebada (CC), rotación maíz-cebada (MC), rotación cebada-maíz (CM), sin residuos (-r) y con residuos (+r). Líneas en las barras corresponden al error estándar. Letras diferentes demuestran tratamientos con diferencias significativas. Coeficiente de variación BR= 174%.

La mayor biomasa radical de la cebada comparada con la de maíz puede deberse posiblemente a: 1) que el manejo agronómico afectó de manera significativa la BR, aumentando este parámetro cuando se aplicó la Agricultura de Conservación, debido a que la rotación de cultivos cebada-maíz genera mayor agregación y estabilidad del suelo (Fuentes *et al.*, 2011, 2012); 2) la alta relación C:N del maíz (48:1) (De León-González *et al.*, 2006) a comparación de la cebada (25:1) (Bingham *et al.*, 2010), indica que la descomposición es más lenta en el caso del maíz a comparación de la cebada, lo que provoca que los sistemas radicales de cereales pequeños como trigo o cebada puedan proveer de un mayor aporte de MO y crear condiciones estructurales favorables (aumentando la agregación) para el desarrollo de las raíces (Fuentes *et al.*, 2011); 3) la descomposición de las raíces muertas en la rotación cebada-maíz, generó bioporos tanto en la superficie (debido a la cebada) como en estratos más profundos (debido al maíz) y éstos se complementan para formar una estructura

favorable para el desarrollo de los sistemas radicales, 4) la menor demanda de nutrientes por parte del cultivo de cebada en comparación con la del maíz (Rodríguez, 2001) como se explicó anteriormente, reduce el crecimiento de las raíces y 5) la densidad de siembra para cada cultivo: cebada 1 700 000-2 000 000 plantas ha⁻¹ y maíz 60 000 plantas ha⁻¹ (CIMMYT, 2012a; 2012b) influyó en la mayor BR de la cebada.

La relación BR/BA no fue significativamente diferente entre los sistemas radicales de maíz y cebada sometidos a disímiles tratamientos (Figura 18). Este parámetro ha sido empleado como indicador de: 1) condiciones favorables para el crecimiento de las raíces y la adquisición de nutrientes, 2) eficiencia de los sistemas radicales para soportar el crecimiento de la biomasa aérea y sus rendimientos y 3) las características varietales de las plantas (Anderson, 1988). La relación entre la producción aérea y la producción subterránea (raíces generalmente) se ve afectada por la luz, los nutrientes, el CO₂, el agua, el ambiente, el desarrollo ontogénico de las plantas, un fuerte control genético y las diferentes variedades de cultivos (Poorter y Nagel, 2000; Reich, 2002; Rodríguez y Álvarez 2010). Las diferencias en BR/BA relacionadas con la disponibilidad de nutrientes se han demostrado en su mayoría en condiciones de ambientes naturales (donde la concentración de nutrientes como el N y P, están muy por debajo que las concentraciones de los suelos cultivados) o con ensayos utilizando diferentes concentraciones de nutrientes. Incrementando el N existe una reducción de la BR/BA, ya que la capacidad exploratoria de las raíces disminuye al tener un adecuado suministro de nutrientes (Ryser y Lambers, 1995; Volin y Reich, 1996; McConnaughay y Coleman, 1999). Mientras que en el caso del P y otros nutrientes la tendencia a la reducción de la BR/BA es menos clara (Eissenstat *et al.*, 1993). La similitud estadística entre los sistemas radicales de los diferentes tratamientos de esta investigación, se puede atribuir a que las parcelas fueron sometidas a fertilización desde el comienzo del experimento (1991) y no se pudo apreciar un cambio significativo en esta relación, sino cambios en la producción de BR y BA en las plantas de maíz sin alterar la relación BR/BA. También hay que

mencionar que la BR/BA responde a un fuerte control genético (Rodríguez y Álvarez, 2010) lo que quizás no permitió observar diferencias en los tratamientos. Tampoco se han demostrado diferencias significativas en la BR/BA por el tipo de labranza que se emplea (Anderson, 1988; Braim 1992; Manschadi *et al.* 1998).

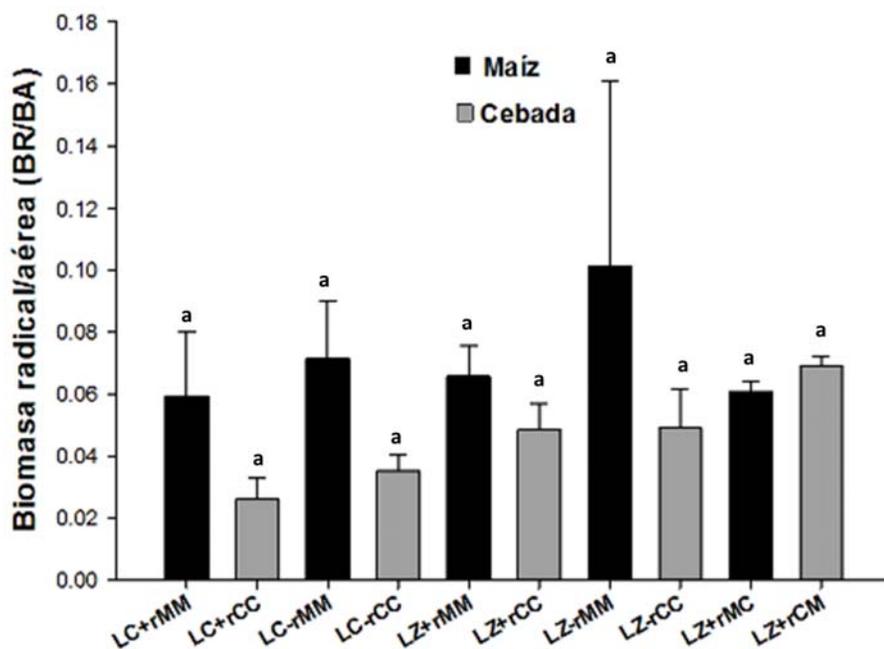


Figura 18. Relación Biomasa radical/aérea 0-20 cm de profundidad de los diferentes tratamientos. Líneas en las barras corresponden al error estándar. Labranza cero (LZ), Labranza convencional (LC), monocultivo de Maíz (MM), monocultivo de cebada (CC), rotación maíz-cebada (MC), rotación cebada-maíz (CM), sin residuos (-r) y con residuos (+r). Letras diferentes demuestran tratamientos con diferencias significativas. Coeficiente de variación BR/BA= 230.27 %.

Los valores reportados en la literatura de BR/BA para cebada son de 0.60 a 0.65 (Natr, 1998) y para maíz 0.44 a 0.15 (Anderson 1988). Aunque algunos autores como Welbank y Williams (1968), Warncke y Barber (1974) y Anderson (1988) mencionaron que se puede apreciar un decremento en los valores cuando se agregó fertilización nitrogenada (concentraciones entre 0 y hasta 180 kg ha⁻¹), ya que las plantas ocupan en mayor medida el N proveniente de la fertilización para aumentar su BA y no su BR. Aunque en este experimento no se alcanzan a observar esas disminuciones de la BR/BA es importante resaltar el tratamiento de LZ-rMM (el de menor calidad estructural), que posee un gran error estándar lo que

pudo hacer que el análisis estadístico no pudiera manifestar diferencias significativas entre este y los demás tratamientos.

5.2 Distribución y estabilidad de agregados.

La distribución y estabilidad de los agregados del suelo fue significativamente diferente entre los tratamientos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Probabilidad de error (P) del diámetro medio ponderado (DMP), porcentaje de micro, meso y macroagregados del suelo 0-20 cm de profundidad de los diferentes tratamientos.

Parámetro	Valor P
Microagregados	0.024*
Mesoagregados	0.028*
Macroagregados	<0.001**
Diámetro medio ponderado	<0.001**

**Muy significativo ($P<0.01$). *Significativo ($P<0.05$). NS no significativo.

Los suelos que presentaron la mayor proporción de microagregados (<0.25 mm) fueron donde se empleó labranza convencional, tanto en monocultivos de maíz como de cebada, con y sin residuos (LC-rCC, LC-rMM, LC+rMM y LC+rCC) y en labranza cero sin residuos, con monocultivo de maíz o cebada (LZ-rCC y LZ-rMM) (Cuadro 4). El efecto de disrupción que promueve la LC indujo la pérdida del contenido de MOS en los macroagregados y por tanto la falta de cohesión entre las partículas del suelo, aumentando la proporción de microagregados (Tisdall y Oades 1982, Six *et al.*, 2000). En el caso de los tratamientos con LZ donde se extrajeron los residuos (LZ-rCC y LZ-rMM), la falta de una cubierta vegetal facilitó la disrupción de los agregados de mayor tamaño (Govaerts *et al.*, 2009; Fuentes *et al.*, 2012). Al implementar la LZ con residuos y monocultivos (LZ+rCC y LZ+rMM) los porcentajes de microagregados disminuyeron debido a la cubierta vegetal. Sin embargo, la Agricultura de Conservación (LZ+rMC y LZ+rCM) redujo las proporciones de microagregados en comparación al resto de los tratamientos, por lo que además de que el mantillo vegetal aporta MO que sirve como agente cementante y estabiliza a los agregados, la rotación de los cultivos permitió que las plantas de maíz y cebada mejoraron la calidad estructural del suelo por medio

de la penetración y la descomposición de sus sistemas radicales (Materchera *et al.*, 1992, Ball-Coelho *et al.*, 1998).

Cuadro 4. Distribución de micro, meso, macroagregados y diámetro medio ponderado de los agregados del suelo de 0-20 cm de profundidad. Labranza convencional (LC), Labranza cero (LZ), con residuos (+r), sin residuos (-r), Monocultivo de maíz (MM) cebada (CC) y rotación maíz-cebada (MC) y cebada-maíz (CM)

Tratamiento	Distribución de agregados (%)			
	Microagregados (<0.25 mm)	Mesoagregados (0.25-1 mm)	Macroagregados (1-8 mm)	Diámetro Medio Ponderado(mm)
Maíz				
LC+rMM	48.77 ^{abc}	11.67 ^d	0.85 ^c	0.11 ^d
LC-rMM	50.38 ^{ab}	7.70 ^c	0.38 ^c	0.08 ^d
LZ+rMM	38.63 ^{cd}	24.85 ^a	3.78 ^c	0.23 ^{bcd}
LZ-rMM	43.47 ^{abc}	17.85 ^{abcd}	4.30 ^c	0.20 ^{cd}
LZ+rMC	35.95 ^d	22.41 ^{abcd}	15.86 ^a	0.48 ^a
Cebada				
LC+rCC	43.40 ^{abc}	13.12 ^d	2.67 ^c	0.15 ^d
LC-rCC	52.72 ^a	10.43 ^d	3.62 ^c	0.28 ^{abcd}
LZ+rCC	35.47 ^{cd}	23.30 ^{abc}	4.03 ^c	0.39 ^{ab}
LZ-rCC	43.25 ^{abc}	18.00 ^{abcd}	4.85 ^c	0.21 ^{bcd}
LZ+rCM	34.95 ^d	24.63 ^{ab}	11.57 ^b	0.37 ^a

*Nivel de significancia $\alpha=0.05$ en la prueba de Diferencias Mínimas Significativas (DMS). Letras diferentes en sentido vertical muestran tratamientos con diferencias significativas.

Los porcentajes más altos de mesoagregados (0.25-1.00 mm) se detectaron en las parcelas donde se practicó la LZ, indistintamente del cultivo y el manejo de residuos (Cuadro 4). Lo anterior puede deberse a que al eliminar la labranza, se puede conservar un mayor número de meso y macroagregados, que generaran una mejor estructura del suelo (Six *et al.*, 2002). La disrupción que genera la LC disminuye el porcentaje de mesoagregados y aumenta el de microagregados (Six *et al.* 1999).

La implementación de la AC provee de una capa o mantillo vegetal que aminora los efectos físicos como el golpe de la gotas de lluvia (Govaerts *et al.*, 2009), incrementa los puntos de infiltración por acción del crecimiento de las raíces (Thierfelder *et al.*, 2005; Govaerts, 2007), el contenido de agua disponible para los cultivos mayormente en los periodos secos (Verhulst *et al.*, 2011) y la actividad biológica produciendo mayores cantidades de cementantes orgánicos (Six *et al.*, 2002). La proporción de macroagregados (1-8 mm) y DMP, fue

significativamente mayor en los tratamientos donde se aplicó la AC (Cuadro 4). Estos resultados coinciden con reportes previos (Fuentes *et al.*, 2009; Govaerts *et al.*, 2009; Fuentes *et al.*, 2012), en los cuales se demostró que la rotación de cultivos genera un mayor número de macroagregados en comparación a los monocultivos. Fuentes *et al.* (2011), en el mismo experimento observaron que las raíces de trigo (en lugar de cebada) generan un mayor número de macroagregados en la superficie (0-5 cm), mientras que las raíces de maíz generan agregación en capas inferiores (10-20 cm). Por lo que las rotaciones LZ+rMC y LZ+rCM presentan mejores condiciones estructurales que los mismos manejos, pero con monocultivos, que resultan en una mayor estabilidad y estructura del suelo para el desarrollo de los cultivos.

5.3 Relación de las variables morfométricas y la agregación del suelo.

En el cultivo de maíz no se encontró correlación significativa entre las variables morfométricas radicales y la agregación del suelo, ya que la RLD incrementó para fines exploratorios a consecuencia de las bajas cantidades de nutrientes. Es decir que por efecto de la penetración de las raíces se rompieron más agregados de los que se formaron (Materechera *et al.*, 1992; Ball-Cohello *et al.*, 1998) con el trigo o la cebada (Gregory *et al.*, 2006). Mientras que para las plantas de cebada los parámetros RLD, AS, DP, BR y BR/BA se correlacionaron significativamente con los porcentajes de micro, meso y macroagregados del suelo (Cuadro 5).

Cuadro 5. Coeficiente de correlación de Pearson (r) de los parámetros morfométricos densidad radical (RLD), área superficial (AS), diámetro promedio (DP), biomasa radical (BR) y relación biomasa radical/aérea (BR/BA) de las plantas de maíz y cebada con el diámetro medio ponderado (DMP), porcentaje de microagregados (%MI), mesoagregados (%ME) y macroagregados (%MA) del suelo 0-20 cm de profundidad.

	Maíz			
	DMP	%MI	%ME	%MA
RLD	-0.088	0.236	-0.346	-0.355
AS	0.266	0.042	-0.287	-0.075
DP	0.483	-0.373	-0.007	0.560
BR	0.161	0.007	-0.165	0.048
BR/BA	0.138	-0.093	0.006	-0.042
	Cebada			
	DMP	%MI	%ME	%MA
RLD	0.31	-0.636*	0.867*	0.768*
AS	0.11	-0.567	0.766*	0.662*
DP	0.052	-0.824*	0.868*	0.548
BR	-0.008	-0.405	0.618*	0.723*
BR/BA	-0.113	-0.368	0.729*	0.793*

**Muy significativo ($P < 0.01$). *Significativo ($P < 0.05$).

La RLD de la cebada fue la única variable que se correlacionó con los tres tamaños de agregados (Figura 19), con los microagregados de forma negativa y con los meso y macroagregados de forma positiva, por lo que se puede sugerir como un indicador de agregación. Se puede observar que al implementar la AC (LZ+rCM) los el porcentaje de microagregados decrece y los porcentajes de meso y macroagregados aumenta. En todos los casos la aplicación de la LC promueve mayor microagregación y menor macroagregación.

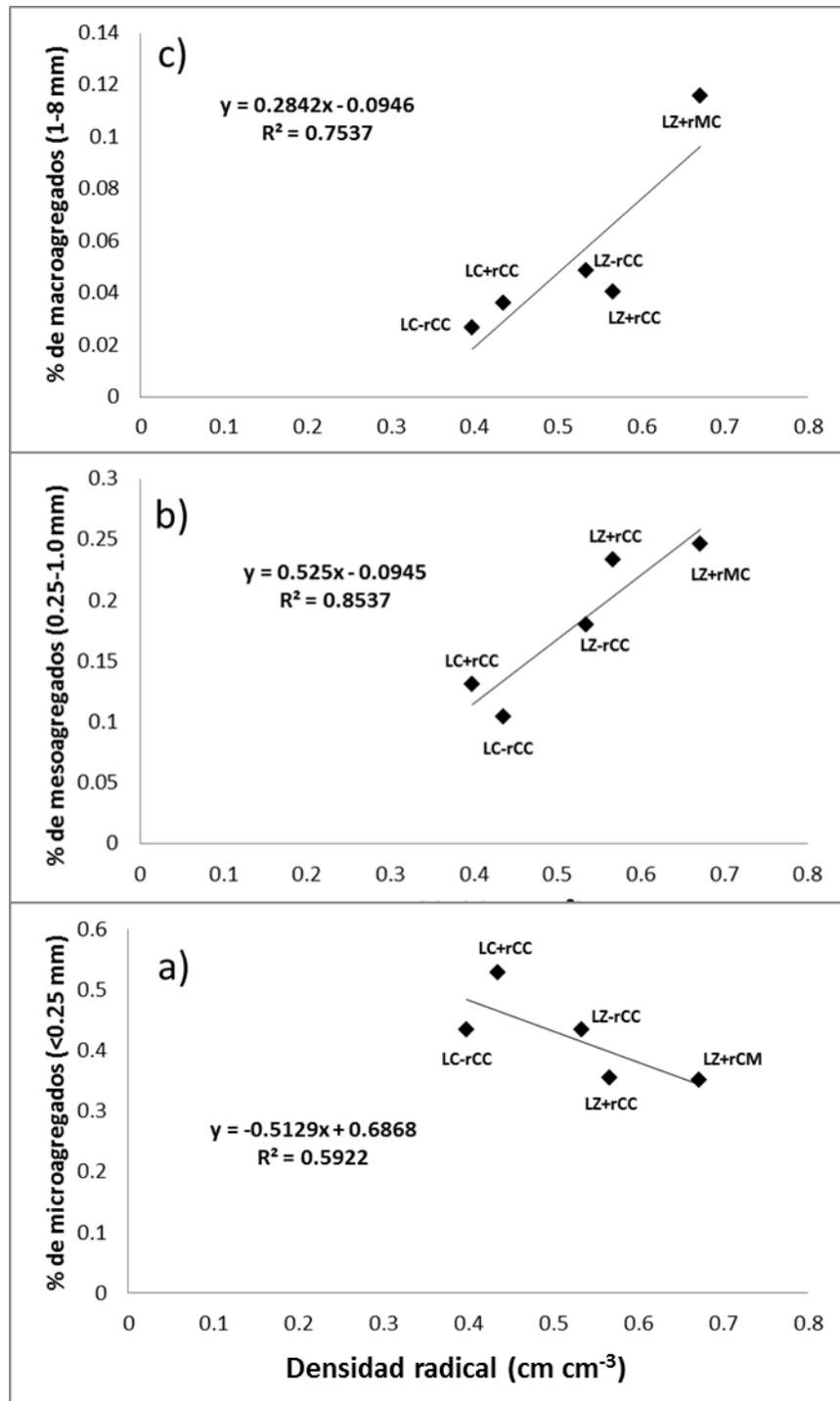


Figura 19. Correlación de la densidad radical (RLD) de las plantas de cebada con el porcentaje de microagregados (a), mesoagregados (b) y macroagregados (c) del suelo 0-20 cm de profundidad. Labranza convencional (LC), Labranza cero (LZ), con residuos (+r), sin residuos (-r), Monocultivo de maíz (MM) cebada (CC) y rotación maíz-cebada (MC) y cebada-maíz (CM).

La rotación de cultivos permitió la formación de agregados en los estratos superficiales (por acción del crecimiento de las raíces de cebada) y el aumento de la RLD propició un mayor número de meso y macroagregados que se formaron por el gran aporte y rápida descomposición de las raíces de cebada. Mientras que un menor número de microagregados fueron formados probablemente por efecto del crecimiento y exploración de las raíces de maíz, las cuales se elongan hacia horizontes más profundos de 10-20 cm rompiendo agregados de mayor tamaño, generando microagregados (Fuentes *et al.*, 2011).

Probablemente el mecanismo que puede explicar la mayor formación de agregados (meso y macroagregados) del suelo por acción de las raíces con la aplicación de la AC es el siguiente: 1) Las raíces de los cereales de grano pequeño crean zonas de falla por la penetración de sus sistemas radicales (Deneff *et al.*, 2002), en el horizonte superficial (0-10 cm) generando una mayor porosidad (Fuentes *et al.*, 2011) y formación de agregados (Gregory *et al.*, 2006; Fuentes *et al.*, 2011); 2) las raíces de maíz generan mayormente microagregados por acción de la penetración de sus raíces en el horizonte 0-20 cm, rompiendo los agregados de tallas mayores (Gregory, 2006; Watteau *et al.*, 2006) y 3) la descomposición del rastrojo de cebada durante el crecimiento del maíz es mas rápida que la descomposición del rastrojo de maíz durante el crecimiento de cebada (Ernst *et al.*, 2000) y se concentra en la capa de 0-10 cm (Fuentes *et al.*, 2009), aumentando la proporción de agregados formados por las raíces de cebada en comparación con los formados por las del maíz.

Se pudo observar una correlación significativa del AS con las proporciones de meso y macroagregados del suelo (Figura 20). La tendencia fue similar a la de la RLD (debido a la relación estrecha que guardan RLD y AS), la AC promueve una mayor agregación en las parcelas experimentales, debido principalmente a la rotación de cultivos de cereales de grano grande (maíz) y grano pequeño (cebada o trigo) lo cual genera una mejor estructura y estabilidad del suelo. A diferencia de la LC, la cual presentó menores porcentajes de meso y macroagregados del suelo,

ya que el proceso de inversión del suelo causa alteraciones sobre, la disponibilidad del agua en las parcelas (Verhulst *et al.*, 2011), la distribución y estabilidad de los agregados (Fuentes *et al.*, 2009; Govaerts *et al.*, 2009) y la distribución y crecimiento de las raíces (Ball-Coehlo *et al.*, 1998; Quin *et al.*, 2004,2005).

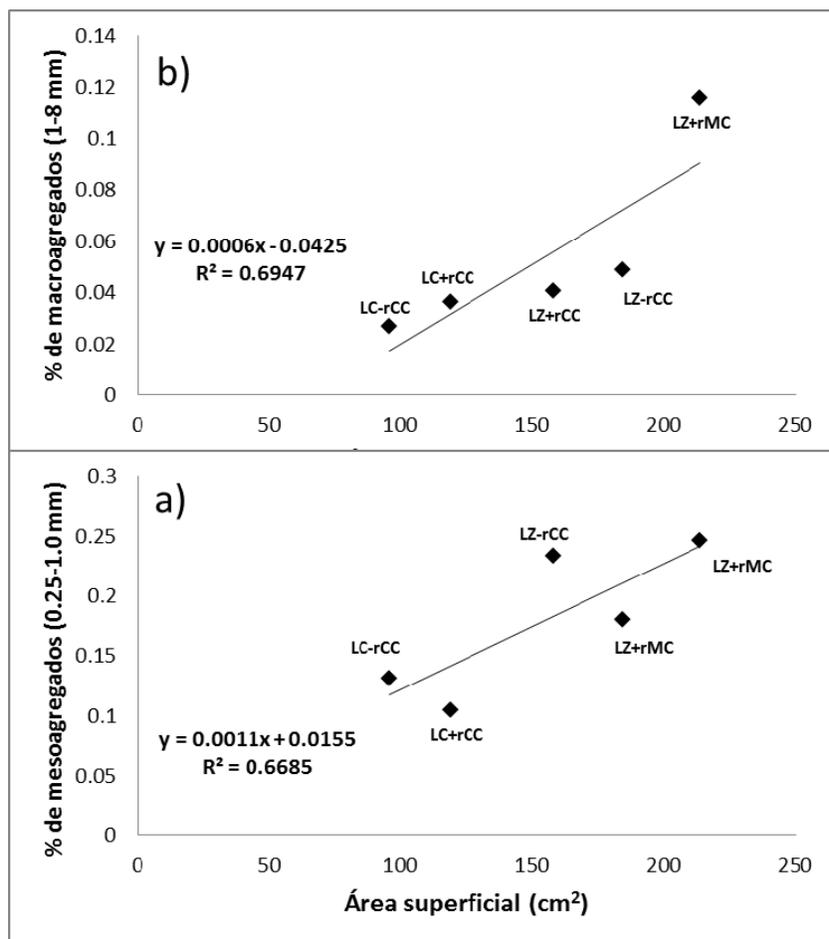


Figura 20. Correlación del área superficial (AS) de las raíces de cebada con el porcentaje de mesoagregados (a) y macroagregados (b) del suelo 0-20 cm de profundidad. Labranza convencional (LC), Labranza cero (LZ), con residuos (+r), sin residuos (-r), Monocultivo de maíz (MM) cebada (CC) y rotación maíz-cebada (MC) y cebada-maíz (CM).

El diámetro promedio (DP) de las raíces de cebada cultivadas bajo Agricultura de Conservación, se correlacionó positivamente con el porcentaje de mesoagregados y disminuyó el de microagregados del suelo (Figura 21). En este caso en el tratamiento LZ+rCM, probablemente las raíces de cebada presentaron un mayor número de raíces finas (<1 mm) que están relacionadas con la formación de macroagregados (Jastrow *et al.*, 1998; De León-González *et al.*,

2007). La degradación de las raíces finas de cebada fue más rápida (debido a pueden ser colonizadas por bacterias que aceleran este proceso), en comparación con las raíces de maíz que presentaron menos raíces finas y una mayor cantidad de raíces lignificadas, las cuales tardan más en degradarse, por lo que la MO que actúa como cementante es limitada (Watteau *et al.*, 2006). Aunque en la gráfica el DP de los tratamientos de AC se observa como el mayor valor, se puede asumir que al momento de digitalizar las raíces de cebada, no se pudo evitar por completo el traslape, ya que los sistemas radicales eran demasiado densos. Estos traslapes pueden sugerir información errónea acerca de los DP aumentando su magnitud, cuando se pudo haber tratado de sistemas radicales en los cuales las raíces poseen un menor diámetro promedio.

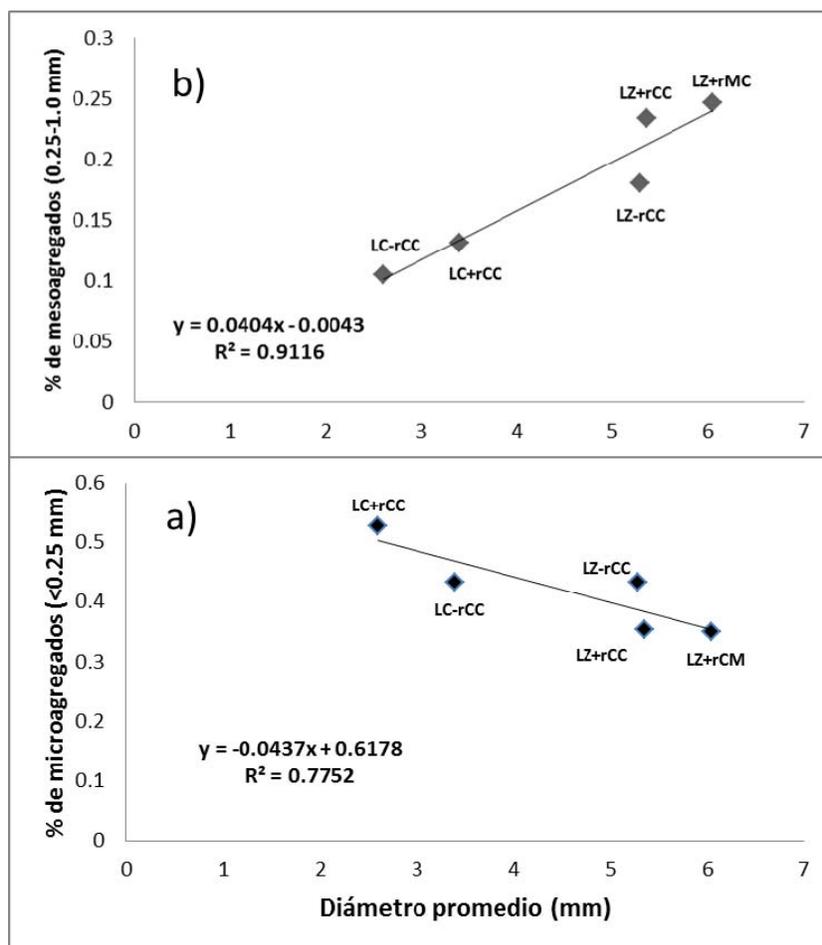


Figura 21. Correlación del diámetro promedio (DP) de las raíces de cebada con el porcentaje de microagregados (a) y mesoagregados (b) del suelo 0-20 cm de profundidad. Labranza convencional (LC), Labranza cero (LZ), con residuos (+r), sin residuos (-r), Monocultivo de maíz (MM) cebada (CC) y rotación maíz-cebada (MC) y cebada-maíz (CM).

En este experimento se logró observar la correlación de la BR de los cultivos de cebada con la formación de meso y macroagregados del suelo (Figura 22). En los tratamientos con LC se obtuvieron las proporciones más bajas de meso y macroagregados por la disrupción que produce este manejo agronómico, mientras que los tratamientos con LZ aumentaron las proporciones de agregados (meso y macro) porque no se laboreó el suelo. El suelo con AC presentó la mayor proporción de meso y macro agregados (0.25-8.00 mm), ya que la rotación de cultivos ofrece el aporte de MOP (principal precursor de la formación de macroagregados) tanto de las raíces de maíz como de cebada, que indujo la formación de macroagregados alrededor de éstos, porque es un fuente de C para la actividad microbiana y la producción de exudados que sirven como agentes cementantes (Golchin *et al.*, 1994; Jastrow *et al* 1998; Six *et al.*, 2000). La tasa de formación de macroagregados por el aporte de MOP por parte de las raíces es igual en ambos sistemas de labranza (LC y LZ). Sin embargo la estabilidad de estos agregados es mayor en LZ, ya que la LC produce disrupciones y la pérdida de MOP, incrementando la descomposición y la reducción de la protección física del C (Six *et al.*, 2000).

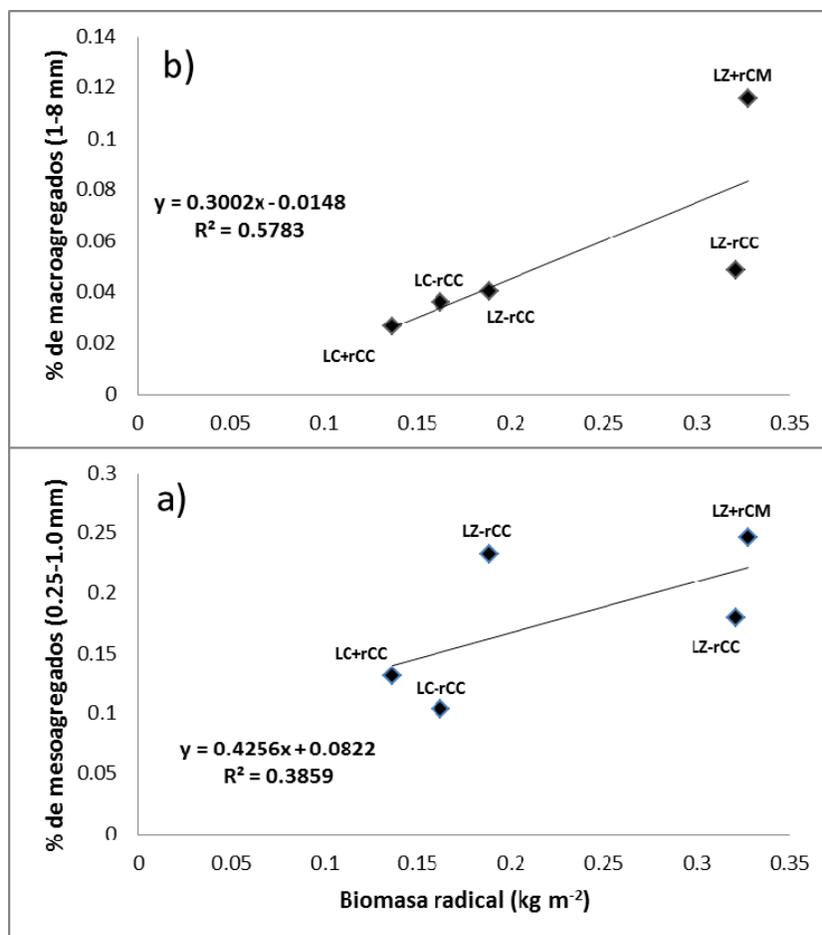


Figura 22. Correlación de la biomasa radical (BR) de las plantas de cebada con el porcentaje de mesoagregados (a) y macroagregados (b) del suelo 0-20 cm de profundidad. Labranza convencional (LC), Labranza cero (LZ), con residuos (+r), sin residuos (-r), Monocultivo de maíz (MM) cebada (CC) y rotación maíz-cebada (MC) y cebada-maíz (CM).

La correlación de la BR/BA de la cebada con el porcentaje de meso y macroagregados puede suponer las condiciones físicas y químicas para el crecimiento de subterráneo y superficial de las plantas. En este caso el tratamiento con AC (LZ+rCM), presenta las mejores condiciones físicas (porosidad, humedad y densidad aparente) y químicas (disponibilidad de nutrientes en el suelo) para el crecimiento de las plantas de cebada y maíz, que permitieron que estas optimizaran su crecimiento y produjeran una mayor cantidad de meso y macroagregados cuando se rotaban los cultivos (Figura 23). A diferencia de los monocultivos con LZ y LC con y sin residuos que pudieron presentar limitantes en la repartición de recursos para el crecimiento subterráneo y aéreo. Es el caso de los tratamientos con LC se observó una menor formación de meso y

macroagregados por la falta de condiciones adecuadas para la agregación (poco aporte de MOP, disturbación del suelo, escaso drenaje, intercambio de gases deficiente), las cuales solo pueden mejorar al implementar la Agricultura de Conservación.

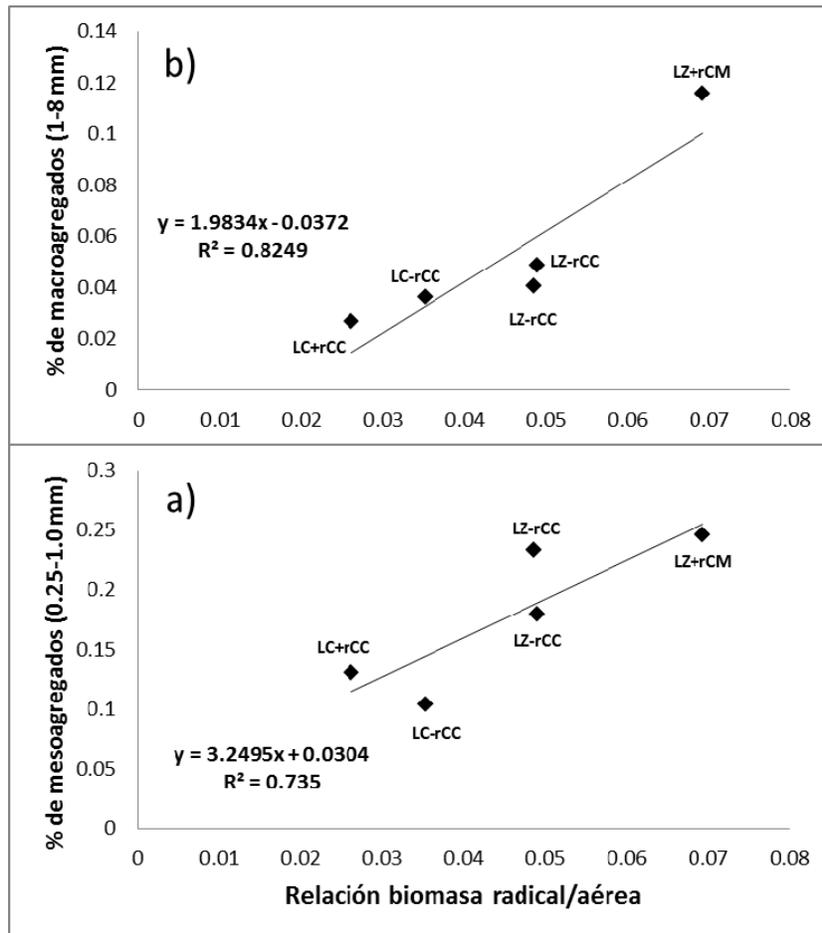


Figura 23. Correlación de la biomasa radical/aérea (BR/BA) de las plantas de cebada con el porcentaje de mesoagregados (a) y macroagregados (b) del suelo 0-20 cm de profundidad. Labranza convencional (LC), Labranza cero (LZ), con residuos (+r), sin residuos (-r), Monocultivo de maíz (MM) cebada (CC) y rotación maíz-cebada (MC) y cebada-maíz (CM).

6. CONCLUSIONES

- La rotación de cultivos, el manejo de los residuos vegetales y la cero labranza (Agricultura de Conservación) formó un mayor número de meso y macroagregados, una estructura del suelo homogénea y más desarrollada, por efecto del crecimiento de los sistemas radicales, a diferencia de los otros manejos agronómicos empleados en esta investigación. El sistema radical de la cebada sin importar el manejo agronómico al que fueron sometidas las plantas generó una mejor estructura del suelo en comparación con los resultados alcanzados con las plantas de maíz.
- La implementación de la Agricultura de Conservación generó condiciones físicas del suelo que permitieron el crecimiento óptimo de los sistemas radicales y la parte aérea de las plantas de cebada y maíz. Lo anterior contrastó con la cero labranza sin residuos y monocultivo de maíz (LZ-rMM), que impidió el desarrollo de la parte aérea y subterránea de las plantas de maíz con respecto a los demás tratamientos.
- Sólo los parámetros de las raíces de cebada obtuvieron correlaciones con la agregación del suelo. Se puede sugerir a la densidad radical (RLD) de la cebada como un indicador de agregación por tener una relación negativa con la microagregación y positiva con la meso y macroagregación. El área superficial (AS) y la biomasa radical (BR) pueden ser considerados como indicadores de meso y macroagregación para las plantas de cebada por su relación directamente proporcional con la formación de agregados de este tamaño. Por último la relación biomasa radical/aérea (BR/BA) al no mostrar diferencias significativas entre tratamientos, puede ser empleada como indicador de meso y macroagregación sin importar la planta que sea empleada.

- Nuestro estudio es una primera contribución, por lo que se recomienda que las investigaciones posteriores se direccionen a la medición de parámetros morfométricos de las raíces en diferentes estadios de desarrollo de las plantas, la tasa de recambio de raíces en los cultivos que se emplearon así como trigo también, realizar estudios de topología y arquitectura de raíces y su relación con la absorción de nutrientes; así como la tasa de descomposición de las raíces de los cultivos, el aporte de materia orgánica particulada y la dinámica del carbono presente en las raíces y los agregados del suelo.

7. REFERENCIAS

- Abdoul A. S., Hossner L.R., Unger P. W. y Stewart B. A. 1997. Tillage and residue effects on root growth and yields of grain sorghum following wheat. *Soil and Tillage Research*. 44 (1): 121-129.
- Anderson, E. L. 1988. Tillage and N fertilization effects on maize root growth and root:shoot ratio. *Plant and Soil*. 108:245-251.
- Amato M. y Ritchie J.T. 2002. Spatial distribution of roots and water uptake of maize (*Zea mays* L.) as affected by soil structure. *Crop Science*. 42: 773-780.
- Angers D.A., Recous, S. y Aita, C. 1997. Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of $^{13}\text{C}^{15}\text{N}$ -labelled wheat straw in situ. *European Journal of Soil Science*. 48: 295-300.
- Angers D.A. y Caron J., 1998. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry* 45: 55-72.
- Acharya C. y Sharma P.D., 1994. Tillage and mulch effects on soil physical environment root growth, nutrient uptake and yield of maize and wheat on an alfisol in north-west India. *Soil and Tillage Research*. 32: 291-302.
- Bais H. P., Loyola Vargas V. M., Flores H. E. y Vivanco J. M. 2001. Root specific metabolism: the biology and biochemistry of underground organs. *In vitro Cellular and Developmental Biology Plant*. 37: 730-741
- Ball-Coelho B. R., Roy R. C. y Swanton C. J., 1998. Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. *Soil and Tillage Research*. 45: 249-273.
- Barber S.A. 1971. Effect of tillage practice on corn (*Zea mays* L.) root distribution and morphology. *Agronomy Journal*. 63:724-726.
- Barber S. A. y Kovar J. L. 1991. Effect of tillage practice on maize (*Zea mays* L.) root distribution. p. 402–409. *In* McMichael B.L. and Persson H. (ed.). *Plant roots and their environment*. Proceedings ISRR Symposium Uppsala, Sweden. 21-26 Aug. 1988. Elsevier. Amsterdam. Netherlands.
- Barley K. P. 1954. Effects of root growth and decay on the permeability of a synthetic sandy loam. *Soil Science*. 78: 205-211
- Barthés B., Azontonde A., Boli B., Prat C. y Roose E. 2000. Field-scale run-off and erosion in relation to topsoil aggregate stability three tropical regions (benin, Cameroon, Mexico). *European Journal of Soil Science*. 51: 485-495.

- Baylis K. P., Feather M., Padgitt y Sandretto C. 2002. Water based recreational benefits of conservation programs: The case of conservation tillage on U.S. cropland. *Review of Agricultural Economics*. 24: 384-393.
- Bingham I. L., Bengough A. G., Rees R. M. 2010. Soil compaction–N interactions in barley: Root growth and tissue composition. *Soil Tillage and Research*. 106: 241-246.
- Braim M. A., Chaney K. y Hodgson D. R. 1992. Effects of simplified cultivation on the growth and yield of spring barley on a sandy loam soil. 2. Soil physical properties and root growth; root:shoot relationships, inflow rates of nitrogen; water use. *Soil and Tillage Research*. 22: 172-187.
- Bronick y Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 124: 3-22
- Caravaca F., Hernandez T., Garcia, C. y Roldan A., 2002. Improvement of rhizosphere aggregate stability of afforested semiarid plant species subjected to mycorrhizal inoculation and compost addition. *Geoderma*. 108: 133:144.
- Caron J, Banton O, Angers D. A. y Villeneneuve J. P. 1996. Preferential bromide transport through a clay loam under alfalfa and corn. *Geoderma* 69: 175-191
- Carter, M.R., Angers, D.A., Kunelius, H.T., 1994. Soil structural form and stability, and organic matter under cool-season perennial grasses. *Soil Science Society of America Journal*. 58: 1194-1199.
- Chan K. Y. y Heenan, D. P., 1999. Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*. 63: 1841-1844.
- Chassot, A y Richner. 2002. Root characteristics and phosphorus uptake of maize seedlings in a bilayered soil. *Agronomy Journal*. 94:118–127
- CIMMyT. 2012a. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz Trigo. <http://maizedoctor.cimmyt.org>. Consultado Abril 2012
- CIMMyT. 2012b. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz Trigo. <http://wheatdoctor.cimmyt.org>. Consultado Abril 2012.
- Czarnes S., Hallett P. D., Bengough A. G. y Young I. M., 2000. Root and microbial derived mucilages affect soil structure and water transport. *European Journal of Soil Science*. 51: 435-443.
- Comisión Nacional del Agua CNA. 2010. Monitor de sequia de América del Norte del mes de mayo de 2010. Consultado Febrero de 2012. <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/sequia/2010/sequia0510.png>

- Cox W.J., Zobel R. W., Van Es H. M. y Otis, D. J., 1990. Tillage effects on some physical and corn physiological characteristics. *Agronomy Journal*. 82, 806-812.
- Christie EK, y Moorby J. 1975. Physiological responses of arid grasses: 1. The influence of phosphorus supply on growth and phosphorus absorption. *Australian Journal of Agricultural Research*. 26:423-436.
- De León-González, F., Celada, E., Hidalgo, C., Etchevers, B.J.D., Flores, M.A., 2006. Root-soil adhesion as affected by crop species in a volcanic sandy soil of Mexico. *Soil Tillage Research*. 90: 77-83.
- De León-González F, Gutiérrez M. C., González-Chávez C. F. y Castillo-Juárez H. 2007. Root-aggregation in a pumiceous sandy soil. *Geoderma* 142: 308-317
- Denef K., Six J., Merckx R., y Paustian K. 2002. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. *Plant and Soil* 246: 185-200.
- Dexter A.R., 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Research*. 11: 199-238.
- Dexter AR. 1991. Amelioration of soil by natural processes. *Soil Tillage Research*. 20: 87-100.
- Dinkelaker B., Romheld V. y Marschner H. 1989. Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rizosphere of whute lupin (*Lupinus albus* L.). *Plant, Cell and Environment*. 12: 285-292.
- Dorioz J.M., Robert M. y Chenu C. 1993. The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach. *Geoderma* 56: 179-194.
- Dwyer L. M., Ma B. L., Stewart D. W., Hayhoe H. N., Balchin D., Culley J. L. B. y McGovern M., 1995. Root mass distribution under conventional and conservation tillage. *Canadian Journal of Soil Science*. 76: 23-28.
- Edwards A. P., Bremner J. M., 1967. Microaggregates in soils. *Journal of Soil Science*. 18: 64-73.
- Eissenstat, D. M., Graham, J. H., Syvertsen J. P. y Drouillard D. L. 1993. Carbon economy of sour orange in relation to mycorrhizal colonization and phosphorus status. *Annals of Botany*. 71:1-10.
- Elliott, E.T., 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society American Journal*. 50, 627-633.

- Emerson W. W., 1959. Stability of soil crumbs. *Nature* 183, 538.
- Emerson W. W. 1977. Physical properties and structure. In: Russell, J.S., Greacen, E.L. (Eds.), *Soil Factors in Crop Production in a Semi-arid Environment*. Queensland University Press. Brisbane. 79-104.
- Ernst O., Bentancur O. y Borges R. 2002. Descomposición de rastrojo de cultivos en siembra sin laboreo: trigo, maíz, soja y trigo después de maíz o de soja. *Agrociencia*. 4:20-26.
- Estabrook E. M., Yoder J. I. 1998. Plant-plant communications: rhizosphere signaling between parasitic angiosperms and their hosts. *Plant Physiology*. 116:1-7.
- Fan M. S., Zhu J. M., Richards C., Brown K. M. y Lynch J. P. 2003. Physiological roles for aerenchyma in phosphorus-stressed roots. *Functional Plant Biology* 30: 493-506.
- FAO. 2011. Conservation Agriculture website. Consultado: Abril de 2011. <http://www.fao.org/ag/ca/x>].
- Fitter A. H. 1985. Functional significance of root morphology and root system architecture. In: Fitter A. H., Atkinson D., Read D. J, Usher M. B, eds. *Ecological Interactions in Soil*. Oxford, UK: Blackwell Scientific. 7–106.
- Fitter A. H. 2002. Characteristics and functions of root systems. In: Waisel Y, Eshel E, Kafkafi U (eds) *Plant roots, the hidden half*, 3rd edn. Dekker, New York, pp 15–32
- Fuentes J. P., Flury, M., Huggins, D. R. y Bezdicek, D. F. 2003. Soil water and nitrogen dynamics in dryland cropping systems of Washington State. *Soil Tillage Research*. 71: 33-47.
- Fuentes M. 2005. Evolución de las propiedades del suelo *cumulic phaeozem* a diferentes sistemas de manejo en un experimento de larga duración .Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Fuentes M., Govaerts B., De León-González F., Hidalgo C., Dendooven L., Sayre K. D. y Etchevers. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *European Journal of Agronomy* 30: 228-237.
- Fuentes, M., Solís, Paola, De León, F., Castorena, C., Govaerts, B. 2011. Crop roots and crop residues management: impacts on soil structure under zero Tillage. 5th World Congress of Conservation Agriculture incorporating 3rd Farming Systems Design Conference, September 2011 Brisbane, Australia.

- Fuentes M., Hidalgo C., Etchevers J. D., De León-González F., Guerrero A., Dendooven L., Verhulst N. y Govaerts B. 2012. Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO₂ emissions. *Plant and Soil*. *In press*.
- Fuglie K. O. y Kascak C. A. 2001. Adoption and diffusion of natural-resource-conserving agricultural technology. *Review of Agricultural Economics* 23(2): 386-403.
- Gale W. J., Cambardella C. A. y Bailey, T. B., 2000a. Surface Residue- and Root-derived Carbon in Stable and Unstable Aggregates. *Soil Science Society of America Journal*. 64: 196-201.
- Gale W. J., Cambardella C. A. y Bailey T. B., 2000b. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. *Soil Science Society of America Journal*. 64: 201-207.
- Ghuman B. S. y Sur H. S., 2001. Tillage and residue management effects on soil properties and yields on rainfed maize and wheat in a subhumid subtropical climate. *Soil Tillage Research*. 58: 1-10.
- Gibbs R. J. y Reid J. B. 1988. A conceptual model of changes in soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Sciences*. 8: 123-149
- Golchin A., Oades J. M., Skjemstad J. O. y Clarke P. 1994a. Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research*. 32: 1043-1068.
- Golchin A., Oades, J. M., Skjemstad, J. O. y Clarke P. 1994b. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C P/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Australian Journal of Soil Research*. 32: 285–309.
- Golchin A., Oades, J. M., Skjemstad J. O. y Clarke, P., 1995 Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected ¹³C natural abundance, pyrolysis mass spectrometry and solid-state ¹³C NMR spectroscopy in density fractions of an Oxisol under forest and pasture. *Australian Journal of Soil Research*. 33: 59-76.
- Govaerts B., Sayre K. D. y Deckers J. 2005 Stable high yields with zero tillage and permanent bed planting? *Field Crops Research*. 94(1): 33-42.
- Govaerts, B., Sayre, K. D., Deckers, J. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research*. 87:163-174

- Govaerts B. 2007. Conservation agriculture, a sustainable production alternative for the (sub)tropical Highlands; Toward an integrated evaluation of the system. Doctoraatsproefschrift nr. 747 aan de faculteit Bio-ingenieurswetenschappen van de K.U.Leuven
- Govaerts B, Sayre K. D, Goudeseune B., De Corte P., Lichter K., Dendooven L. y Deckers J. 2009. Conservation agriculture as a sustainable option for the central Mexican highlands. *Soil Tillage Research*. 103: 222-230
- Granssee A. y Wittenmayer L. 2000. Qualitative and quantitative analysis of water soluble root exudates in relation to plant species and development. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 163: 381-385.
- Gregory P. J. 2006. Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science? *European Journal of Soil Science*. 57:2–12.
- Gutormson T. 2002. Small grains: Seed size. Consultado en línea marzo de 2012. <http://www.wintercereals.us/Documents/Growing%20WW/Production%20Articles/General%20Seeding%20Issues/Small%20Grains%20Seed%20Size.pdf>
- Hamblin A. 1987. The effect of tillage on soil physical conditions. In: Cornish, P.S., Pretty, J.E. (Eds.), *Tillage: New directions in Australian Agriculture*. Australian Society of Agronomy, pp. 128–170.
- Hawes M. C., Gunawardena U., Miyasaka S. y Zhao X. 2000. The role of root border cells in plant defense. *Trends in Plant Science*. 5: 128-133.
- Haynes R. J. y Beare M. H. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry*. 29: 1647-1653.
- Hilfiker R. E. y Lowery B. 1988. Effect of conservation tillage systems on corn root growth. *Soil Tillage Research*. 12: 269-283.
- Hobbs P. R. y Gupta R. K. 2004. Problems and challenges of no-till farming for the rice-wheat systems of the Indo-Gangetic Plains in South Asia. In R. Lal, P. Hobbs, N. Uphoff, and D.O. Hansen (eds.). *Sustainable Agriculture and the Rice-Wheat System*. Columbus, Ohio, and New York, USA: Ohio State University and Marcel Dekker, Inc. Pp. 101-19.
- Holanda F. S. R., Mengel D. B., Paula M. B., Carvaho J. G., y Bertoni J.C. 1998. Influence of crop rotations and tillage systems on phosphorus and potassium stratification and root distribution in the soil profile. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 29: 2383-2394.

- Hughes K. A., Horne D. J., Ross C. W. y Julian J.F. 1992. A10-year maize/oats rotation under three tillage systems: 2. Plant population, root distribution and forage yields. *Soil Tillage Research*. 22: 145-157.
- Hutsch B. W., Augustin J. y Merbach W. 2002. Plant rhizodeposition an important source for carbon turnover in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 165: 397-407.
- IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources, FAO, Rome, Italy, 2006, p. 128.
- Jastrow J. D., Miller R. M. y Lussenhop J. 1998. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biology and Biochemistry*. 30: 905-916.
- Juergens L. A., Young D. L., Schillinger W. F. y Hinman H. R. 2004. Economics of alternative no-till spring crop rotations in Washington's wheat-fallow region. *Agronomy Journal*. 96: 154-158.
- Kemper W. y Rosenau C. 1986. Aggregate stability and size distribution. En Klute A (Ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2a ed. American Society of Agronomy. Madison, WI, EEUU. pp. 425-442
- Karutanilake U., van E H. M. y Schindelbeck R.R. 2000. Soil and maize response to plow and no-tillage after alfalfa-to-maize conversion on a clay loam soil in New York. *Soil Tillage Research*. 55:31-42.
- Kumar U. y Dey P. 2011. Effects of different mulches and irrigation methods on root growth, nutrient uptake, water-use efficiency and yield of strawberry, *Scientia Horticulturae*. 127(3): 318-324,
- Lampurlanés J., Angás P., y Cantero-Martínez C. 2001. Root growth, soil water content, and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions. *Field Crops Research*. 69:27-40.
- Lampurlanés, J., P. Angas, y Cantero-Martínez. 2002. Tillage effects on water storage during fallow, and on barley root growth and yield in two contrasting soils of the semi-arid Segarra region in Spain. *Soil and Tillage Research*. 65: 207-220.
- Lampurlanés J. y Cantero-Martinez C. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agronomy Journal*. 95: 526-536.

- Lipiec J., Kuoe J., Nosalewicz A. y Turski, M. 2006. Tillage system effects on stability and sorptivity of soil aggregates. *International Agrophysics*. 20, 189-193.
- Lynch, J.M. y Whipps, J.M. 1990. Substrate flow in the rhizosphere. *Plant and Soil* 129, 1-10. In: *The Rhizosphere and Plant Growth* (ed. D.L. Keister and P.B. Cregan), pp. 15-24.
- Lynch J.P. 2007. Roots of the second green revolution. *Australian Journal of Botany*. 55: 493-512.
- Malamoud K., McBratney A. B., Minasny B., Field D. J., 2009. Modelling how carbon affects soil structure. *Geoderma*. 149: 19-26
- Manschadi A. M., Sauerborn J., Stützel H., Göbel W. y Saxena M.C. 1998. Simulation of faba bean (*Vicia faba* L.) root system development under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*. 9: 259-272.
- Martínez E., Fuentes J. R, Silva P., Valle S. y Acevedo E. 2008. Soil physical and water root growth as affected by no-tillage and convencional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil Tillage Research*. 99: 232-244.
- Materechera S. A., Dexter A. R., y Alston A. M.1992. Formation of aggregates by plant roots in homogenized soils. *Plant and Soil*. 142: 69-79
- Materechera S. A., Kirby J. M., Alston A. M. y Dexter A. R. 1994. Modification of soil aggregation by watering regime and roots growing through beds of large aggregates. *Plant and Soil*. 160: 57-66.
- McConnaughay K. D. M. y Coleman J. S. 1999. Biomass Allocation in Plants: Ontogeny or Optimalyty? a Test Along Tree Resource Gradients. *Ecology*. 80:2581-2593.
- Meek B. D., Rechel E. A, Carter L. M. y DeTar W. R. 1989. Changes in infiltration under alfalfa as influences by time and wheel traffic. *Soil Science Society of America Journal*. 53: 238-241.
- Meek B. D., DeTar W. R., Rolph D, Rechel E. R. y Carter L. M. 1990. Infiltration rate as affected by an alfalfa and no-till cotton cropping system. *Soil Science Society of America Journal*. 54: 505-508.
- Merbach W., Mirus E., Knof G., Remus R., Ruppel S., Russow R., Gransee A. y Schulze, J. 1999. Release of carbon and nitrogen compounds by plant roots and their possible ecological importance. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 162: 373-383.

- Merrill S. D., Black A. L. y Bauer A. 1996. Conservation tillage affects root growth of dryland spring wheat under drought. *Soil Science Society America Journal*. 60: 575-583.
- Miller R. M. y Jastrow J. D. 1990. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biology and Biochemistry*. 22: 579-584.
- Mitchell A. R., Ellsworth T. R. y Meek B. D. 1995. Effect of root systems on preferential flow in swelling soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 26: 2655-2666.
- Morel J., Habib L., Plantureux S. y Guckert A. 1991. Influence of maize root mucilage on soil aggregate stability. *Plant and Soil* 136: 111-119.
- Muñoz-Romero V., Benitez-Vega J., Lopez-Bellido R.J. y Lopez-Bellido L., 2010. Monitoring wheat root development in a rainfed Vertisol: tillage effect. *European Journal of Agronomy*. 33, 182–187.
- Muñoz-Romero V., López-Bellido L. y López-Bellido R.J., 2011. Faba bean root growth in a Vertisol: tillage effects. *Field Crops Research*. 120: 338-344.
- Nardi S., Concheri G., Pizzeghello D., Sturaro A., Rella R. y Parvoli G. 2000. Soil organic matter mobilization by root exudates. *Chemosphere*. 5: 653-658.
- Natr L. 1988. Shoot/root ratio during the early heterotrophic growth of barley as influenced by mineral nutrition. *Plant and soil*. 111: 237-240
- Newell R. L. y Wilhelm W. W. 1987. Conservation tillage and irrigation effects on corn root development. *Agronomy Journal*. 79: 160-165.
- Nicoullaud B., King D. y Tardieu F. 1994. Vertical distribution of maize roots in relation to permanent soil characteristics. *Plant and Soil* 159: 245-254.
- Oades J.M., 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil* 76: 319-337.
- Oades J. M. y Waters A. G. 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research*. 29: 815-828.
- Otegui, O., J. Zamalvide, C. Perdomo, R. Goyenola y A. Cerveñanasky. 2002. Momento de aplicación de nitrógeno: efecto en eficiencia de uso del fertilizante, rendimiento y concentración proteica en grano de cebada cervecera en Uruguay. *Terra* 20: 71-80.
- Ozpinar S. y Baytekin H. 2006. Effects of Tillage on Biomass, Roots, N-accumulation of Vetch (*Vicia sativa* L.) on a Clay Loam Soil in Semi-arid Conditions. *Field Crops Res*. 96: 235-242.

- Pearson, G.J., I. G. Mann, y Z. Zhang. 1991. Changes in root growth within successive wheat crops in a cropping cycle using minimum and conventional tillage. *Field Crops Research*. 28:117-133.
- Poorter H. y Nagel O. 2000. The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO₂, nutrients and water: a quantitative review. *Australian Journal of Plant Physiology*. 27: 595-607.
- Puget P. y Drinkwater, L.E., 2001. Short-term dynamics of root and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Science Society of America Journal*. 65: 771-779.
- Qin R., Stamp P. y Richner W. 2004. Impact of Tillage on Root Systems of Winter Wheat. *Agronomy Journal*. 96: 1523-1530.
- Qin, R., Stamp, P. y Richner W. 2005. Impact of Tillage and Banded Starter Fertilizer on Maize Root Growth in the Top 25 Centimeters of the Soil. *Agronomy Journal*. 97: 674-683.
- Raczkowski C. W. 1989. Effects of four tillage systems on corn (*Zea mays* L.) root distribution in the North Carolina Piedmont. Dissertation. Abstracts International B. 50-380.
- Rasse D. P., Smucker A. J. y Santos D. 2000. Alfalfa Root and Shoot Mulching Effects on Soil Hydraulic Properties and Aggregation. *Soil Science Society of America Journal*. 64: 725-731.
- Ravina I. 1983. The influence of vegetation on moisture and volume changes. *Geotechnique*. 33: 151-157.
- Reich 2002. Root-Shoot Relations: Optimality in Acclimation and Adaptation or the "Emperor's New Clothes"? In: Waisel Y, Eshel E, Kafkafi U (eds) *Plant roots, the hidden half*, 3rd edn. Dekker, New York, pp 15-32.
- Reid J. B., Goss M. J. y Robertson P. D. 1982. Relationships between the decreases in soil stability effected by the growth of maize roots and changes in organically bound iron and aluminum. *Journal of Soil Science*. 33: 397-410
- Rhoton F.E. 2000 Influence of time on soil response to no-till practices. *Soil Science Society of America Journal*. 64: 700-709.
- Rodríguez, J., Pinochet, D. Y Matus,F. 2001. Fertilización de los cultivos. Santiago-Talca-Valdivia. Chile
- Rodríguez S. J. y Alvarez M. J. 2010. Nutrición de las plantaciones forestales. Grafica Lom. Santiago de Chile.

- Roseberg R. J. y McCoy E. L., 1992. Tillage and traffic-induced changes in macroporosity and macropore continuity: air permeability assessment. *Soil Science Society America Journal*. 56: 1261-1267.
- Rillig M. C. y Mummey D. L. 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*. 171: 41–53.
- Ritchie S. W., and J. Hanway. 1984. How a corn plant develops. Special Report Number 48. Iowa State University of Science and Technology, Ames, Iowa. 21 p.
- Ryser P. y Lambers H. 1995. Root and leaf attributes accounting for the performance of fast and slow growing grasses at different nutrient supply. *Plant and Soil* 170: 251-265.
- Sayre K. D. 1998. Ensuring the use of sustainable crop management strategies by small wheat farmers in the 21st century. Wheat Special Report No. 48. CIMMYT, Mexico, DF.
- SEMARNAT 2002. Portal electrónico. Consultado en Enero de 2012. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen/03_suelos/cap3.html
- Semmel H., Horn R., Hell U., Dexter A. R. y Schulze E. D. 1990. The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. *Soil Technology* 3: 113-129.
- Shaxson T.F. y Barber R.G. 2003. Optimizing Soil Moisture for Plant Production: The Significance of Soil Porosity. *FAO Soils Bulletin* 79. Rome, Italy. 1-107.
- Shipitalo M. J., Dick W. A. y Edwards W. M. 2000. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. *Soil Tillage Research*. 53: 167-183.
- Shipitalo, M.J. y Protz, R. 1989. Chemistry and micromorphology of aggregation in earthworm casts. *Geoderma* 45, 357–374.
- Shukla M. K., Lal R.B., Owens L. y Unkefer, P. 2003. Land use management impacts on structure and infiltration characteristics of soils in the north Appalachian region of Ohio. *Soil Science*. 168: 167-177.
- Sidiras N., Avgoulas C., Bilalis D. y Tsougrianis, N. 1999. Effects of tillage and fertilization on biomass, roots, N-accumulation and nodule bacteria of vetch (*Vicia sativa* cv. Alexander). *Journal of Agronomy and Crop Science*. 182: 209-216.

- Sidiras N., Bilalis D. y Vavoulidou E. 2001. Effects of tillage and fertilization on some selected physical properties of soil (0-30 cm depth) and on the root growth dynamic of winter barley (*Hordeum vulgare* cv. 'Niki'). *Journal of Agronomy and Crop Science* 187:167-176.
- SigmaPlot® v12.0. 2011. Systat Software, Inc.
- Six J., Elliott E. T. y Paustian, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*. 32: 2099-2103.
- Six J., Feller C., Deneff K., Ogle S.M., De Moraes, Sá J.C y Albrecht, A., 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-effects of no tillage. *Agronomie*. 22: 755-775.
- Six J., Bossuyt H., Degryze S. y Deneff K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*. 79(1): 7-31.
- Tisdall J. M. y Oades J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*. 62: 141-163.
- Thierfelder C., Amezquita E. y Stahr K., 2005. Effects of intensifying organic manuring and tillage practices on penetration resistance and infiltration rate. *Soil and Tillage Research* 82: 211-226.
- Tracy, P. W., Westfall, D. G., Elliot, E. T., Peterson, G. A., Cole C. V. 1990. Carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur mineralization in plow and, no-till cultivation. *Soil Science Society American Journal*. 54: 457-461.
- Traore O., Groleau-Renaud V., Plantureux S., Tubeileh A. y Boeuf-Tremblay V. 2000. Effect of root mucilage and modeled root exudates on soil structure. *European Journal of Soil Science*. 51: 575-581.
- Turrent-Fernández, A.; Aveldaño-Salazar, R. y Moreno-Dahme, R. 1996. Análisis de las posibilidades técnicas de la autosuficiencia alimentaria sostenible de maíz en México. *Terra*. 14:445-468.
- Turrent-Fernández, A. 2009. Potencial productivo de maíz en México. *La Jornada del Campo*. Núm. 16. México D. F. 16-17 pp.
- Uribe G., S., A. Turrent F., N. Francisco N. y R. Camacho C. 1998. Productividad y estabilidad del rendimiento de maíz en terrazas de muro vivo en el trópico de México. *Agrociencia* 32: 301-309.

- Uribe G., S., N. Francisco N. y A. Turrent F. 2002. Pérdida de suelo y nutrientes en un Entisol con prácticas de conservación en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia* 36: 161-168.
- Verhulst N., Nelissen V., Jespers N., Haven H., Sayre K. D., Raes D., Deckers J., Govaerts B. 2011. Soil water content, maize yield and its stability as affected by tillage and crop residue management in rainfed semi-arid highlands. *Plant and Soil* 344:73–85.
- Veseth R. 1988. Conservation Tillage Considerations for Cereals. <http://pnwsteep.wsu.edu/tillagehandbook/chapter2/021288.htm>. Consultado en Abril de 2010.
- Volin J. C. y Reich P. B. 1996. Interaction of elevated CO₂ and O₃ on growth, photosynthesis and respiration of three perennial species grown in low and high nitrogen. *Physiology Plant.* 97:674-684.
- Volke, H.V., B. Etchevers, R. Sanjuán y P. Silva (1998). Modelo de balance nutrimental para la generación de recomendaciones de fertilización para cultivos. *Terra.* 16: 79-91.
- Walker T. S., Pal Bais, H., Grotewold, E y Vivanco, J. M. 2003. Root Exudation and Rhizosphere Biology. *Plant Physiology.* 13244:51
- Warncke D. D. y Barber S. A. 1974. Root development and nutrient uptake by corn grown in solution culture. *Agronomy Journal.* 66:514-516.
- Watt M., McCully M.E. y Canny M.J. 1994. Formation and stabilization of rhizosheaths of *Zea mays* L.—effect of soil-water content. *Plant Physiology.* 106: 179-186.
- Watteau F., Villemin G., Burtin G. y Jocteur-Monrozier L. 2006. Root impact on the stability of types of microaggregates in silty soil under maize. *European Journal of Soil Science* 57: 47-257.
- Weil, R.R., Benedetto P. W., Sikora, L. J., Bandel, V. A. 1988. Influence of tillage practices on phosphorus distribution and forms in three Ultisols. *Agronomy J.*, 80: 503-509.
- Welbank P. J. y Williams E. D. 1968. Root growth of a barley crop estimated by sampling with portable powered soil-coring equipment. *Journal of Applied Ecology.* 5:477-481.
- Whalley W. R., Riseley B., Leeds-Harrison P. B., Bird N. R. A., Leech P. K. y Adderley W. P. 2005. Structural differences between bulk and rhizosphere soil. *European Journal of Soil Science.* 56: 353-360.

WhinRizo® v.Reg. 2008. Regent Instruments.

Xie Y.J. y Yu D. 2003. The significance of lateral roots in phosphorus (P) acquisition of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Aquatic Botany* 75: 311-321.

Yamagishi J., Nakamoto T. y Richner W. 2003. Stability of spatial variability of wheat and maize biomass in a small field managed under two contrasting tillage systems over 3 years. *Field Crops Research*. 81: 95-108.

Young I. M. 1998. Biophysical interactions at the root–soil interface: a review. *Journal of Agricultural Science*. 130: 1-7.

Zadoks, J. C., Chang, T. T. y Konzak, C. F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*. 14: 415-421.

Zhu J. Lynch J. P. 2004. The contribution of lateral rooting to phosphorus acquisition efficiency in maize (*Zea mays* L.) seedlings. *Functional Plant Biology* 31: 949-958.