



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

## **“Consecuencias de la agricultura de conservación en la eficiencia del uso de agua bajo condiciones de riego”**

**Fabian Kienle**

**TESIS**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2008

La presente tesis, titulada: “**Consecuencias de la agricultura de conservación en la eficiencia del uso de agua bajo condiciones de riego**”, realizada por el alumno **Fabian Kienle** 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**

**Hidrociencias**

Consejo Particular:

CONSEJERO:

---

DR. LEONARDO TIJERINA CHÁVEZ

DIRECTOR DE TESIS:

---

DR. BRAM GOVAERTS

ASESORA:

---

M. C. NELE VERHULST

Montecillo, Texcoco, Edo. de México; Diciembre de 2008

## CONSECUENCIAS DE LA AGRICULTURA DE CONSERVACIÓN EN LA EFICIENCIA DEL USO DE AGUA BAJO CONDICIONES DE RIEGO

Fabian Kienle, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2008

Esta investigación se realizó en un experimento a largo plazo establecido en 1992 para evaluar el suelo sometido a diferentes prácticas de labranza y manejos de rastrojo del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), en la estación experimental en el Centro de Investigaciones Agrícola del Noroeste (CIANO) en Ciudad Obregón, Sonora, México, en el invierno 2008. Se evaluaron cinco diferentes sistemas agrícolas respecto a su eficiencia en el uso de agua (EUA) en el cultivo de trigo, y un sistema de riego por tubería con compuerta. Los cinco diferentes sistemas incluyeron camas convencionales (CAC) con incorporación de paja y camas permanentes (CAP) con cuatro diferentes manejos de paja (paja incorporada, paja quemada, paja removida, paja parcialmente removida y paja retenida). El tipo de suelo en la estación del CIANO es arcillo arenoso (Vertisol). El clima se clasifica como subtropical árido. Para evaluar la EUA se hicieron mediciones en el cultivo, en el suelo y el riego. Se evaluaron el desarrollo del cultivo mediante un sensor de índice diferencial normalizado de vegetación y la cobertura por follaje. En el suelo se evaluó la cobertura por rastrojo, la elasticidad del suelo, el agrietamiento, el tiempo de encharcamiento, la resistencia a la penetración del suelo y el contenido de humedad del suelo. Para el riego se diseñó un método para evaluar el riego a nivel de parcela experimental que consistió en la medición de agua por cama, el agua de entrada, la tasa de avance y la salida del agua. En las CAP con retención de paja el desarrollo inicial del cultivo fue más tardado en comparación a CAC, pero en total el primero tenía más tiempo en la actividad fotosintética. Los sistemas con retención de paja (total o parcial) tienen un tiempo de encharcamiento mayor que los otros sistemas. La resistencia a la penetración del suelo fue lo más alto en CAP con quema de paja. La labranza disminuye la resistencia en la capa superficial en comparación con las CaP, mientras que las CaP con retención de paja tuvieron la distribución de la resistencia más uniforme en el perfil. La elasticidad del suelo fue la más baja en CaP con quema de paja. La superficie de grietas fue más alta en CaP con retención de paja que en CaP con quema de paja y CaC. La medición de la entrada del agua y de la tasa de avance del agua así como la medición de salida del agua con una adaptación de un vertedor de cresta triangular resultó adecuada para la evaluación del riego a nivel de parcela experimental. La infiltración del agua del riego fue mayor en CaP con retención de paja que en CaP con quema de paja y CaC. El manejo de quemar los residuos es una práctica no recomendable por el efecto disminuir la calidad del suelo. Los sistemas de manejo agrícolas con retención de paja total o parcialmente, contribuyen para tener una mayor eficiencia en el uso de agua.

**Palabras clave:** agricultura de conservación, calidad de suelo, vertedor de cresta triangular, riego por surcos

## CONSEQUENCES OF CONSERVATION AGRICULTURE IN WATER USE EFFICIENCY IN IRRIGATION CONDITIONS

Fabian Kienle, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2008

This investigation was realized in a long term trial established in 1992 to evaluate different tillage and straw management of the International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT) in the experimental station of the Northwestern Agricultural Investigation Centre (Centro de Investigaciones Agrícola del Noroeste, CIANO) near Ciudad Obregón, in Sonora, Mexico, in 2008. Five different agricultural systems were evaluated in respect of the water use efficiency (WUE) in wheat under furrow irrigation. The five systems were conventional beds (CTB) with incorporation of crop residue and permanent beds (PB) with four residue managements (burning of straw, straw removal, partial and full straw retention). The soil type at CIANO station is a coarse sandy clay (Vertisol). The climate is subtropical arid. To evaluate WUE measurements of crop, soil and irrigation were taken. Of crop development the Normalized Difference Vegetation Index and crop ground cover were measured. Mulch ground cover, soil resilience, cracking, time-to-pond, penetration resistance and soil moisture were measured to evaluate soil quality. To evaluate irrigation a method to measure irrigation on experimental plot level was developed consisting in the measurement of inflow, outflow and advance-rate. Irrigation water had a higher advance rate in systems without straw retention than in PB with straw retention. The infiltration of water was higher in PB with straw retention than in PB with straw burned and CTB. In PB with straw retention the initial crop development was delayed in comparison to CTB, but in total CTB had a longer time of photosynthetic activity. Straw retaining systems have a higher direct infiltration (time to pond) than other systems. Penetration resistance was the highest in PB with burning of residue. Tillage decreased the penetration resistance in the top layer in comparison with PB, while the distribution of penetration resistance was the most uniform throughout the profile in permanent beds with residue retention. Soil self-mulching capacity was the lowest in permanent beds with residue burning. The surface of cracks was higher in PB with residue retention than in PB with burning of residue and CB. Inflow and advanced measurement as well as outflow measurement with an adaption of a v-notch weir resulted adapted for irrigation evaluation at experimental plot level. The irrigation water advanced faster in systems without mulch cover. The infiltration of irrigation water was higher (but not significantly) in PB with residue retention than in PB with residue burning and conventional beds. The system of burning straw is a practice which reduces permeability of the surface soil. The systems of agricultural managements with total or partly straw retention contribute to a better water use efficiency.

**Index words:** conservation agriculture, soil quality, V-notch weir, furrow-irrigation

## **Agradecimientos**

Gott sei Dank!

Gracias a mis padres.

Agradezco al Pueblo de México que me dio la oportunidad y a través del CONACyT el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Estoy muy agradecido mi Consejo Particular: Al Dr. Leonardo Tijerina Chávez, al Dr. Bram Govaerts y Ir. Nele Verhulst por todo su apoyo, tiempo, dirección y enseñanza.

Un gran agradecimiento a mi equipo favorito: Manuel de Jesús Ruiz Cano, Juan de Dios Sánchez López, Jesús A. Gutiérrez Angulo, Álvaro Zermeño, Cristóbal Rascón y a Beatriz Martínez Ortiz

Gracias también en especial a José, Carlos y Luis que como amigos y compañeros me dieron tanto apoyo en toda la maestría, a Uli y Andrea, a Chalo Bonilla y hermanas por todo en Sonora, a Kathi y Enzo, Thomas, Miguel y Corny, a Hannes con Melanie y Rosa-Maria, Michi con Johanna, a Cinthia y a mis hermanos Julia, Wibke y Jakob.

A toda la gente en el Colegio de Postgraduados y el CIMMYT que me apoyaron con su parte.

# Contenido

Índice de figuras .....	iii
Índice de cuadros .....	iv
Índice de cuadros .....	v
1 Introducción.....	1
1 Objetivos e hipótesis .....	3
1.1 Objetivo general.....	3
1.1.1 Objetivos particulares.....	3
1.2 Hipótesis .....	3
2 Revisión de literatura.....	4
2.1 Agricultura de Conservación .....	4
2.2 Eficiencia en el uso del agua .....	6
2.3 Evaluación del riego .....	9
2.4 El suelo del área de estudio .....	10
3 Materiales y Métodos .....	13
3.1 Caracterización del Campo experimental del CIMMYT en Ciudad Obregón, Sonora .....	13
3.2 Descripción del experimento a largo plazo .....	14
3.3 Características del cultivo .....	17
3.3.1 Índice diferencial de vegetación normalizado.....	17
3.3.2 Cobertura del suelo por el follaje.....	18
3.3.3 Cobertura del suelo por rastrojo.....	18
3.4 Características de suelo .....	18
3.4.1 Tiempo de encharcamiento (TE) .....	18
3.4.2 Resistencia a la penetración del suelo.....	19
3.4.3 Contenido de humedad del suelo.....	19
3.4.4 Agrietamiento .....	20
3.4.5 Elasticidad del Suelo (Medido solo en suelo a 0-5 cm).....	21
3.5 Mediciones de riego.....	22
3.5.1 Desarrollo de un método para evaluar el riego a nivel de parcelas	

experimentales.....	22
3.5.2 Entrada de agua.....	25
3.5.3 Salida de agua.....	25
3.5.4 Tasa de avance.....	26
4 Resultados.....	27
4.1 Desarrollo del cultivo.....	27
4.1.1 Índice diferencial de vegetación normalizado.....	27
4.1.2 Cobertura del suelo por el follaje.....	32
4.2 Suelo.....	35
4.2.1 Cobertura del suelo por rastrojo.....	35
4.2.2 Elasticidad de suelo.....	36
4.2.3 Agrietamiento.....	37
4.2.4 Tiempo de encharcamiento (TE).....	39
4.2.5 Resistencia a la penetración del suelo.....	41
4.2.6 Contenido de humedad del suelo.....	44
4.3 Mediciones de riego.....	50
4.3.1 Flujo de agua.....	50
4.3.2 Tasa de avance.....	53
4.3.3 Infiltración.....	54
1.1.1 Lamina de riego.....	55
Conclusiones.....	57
5 Literatura citada.....	58
Anexos.....	66

## Índice de figuras

Figura 1: Croquis de la cresta del vertedor.....	10
Figura 2: Normales climatológicas de Ciudad Obregón de 1971 a 2000.....	13
Figura 3: Croquis del lote experimental a largo plazo.....	16
Figura 4Ajuste del vertedor en el campo.....	23

Figura 5: Croquis del vertedor.....	24
Figura 6: NDVI de parcelas con nivel de fertilización 0 kg N ha <sup>-1</sup> .....	28
Figura 7 NDVI de parcelas con nivel de fertilización 150 kg N ha <sup>-1</sup> .....	29
Figura 8 NDVI de parcelas con nivel de fertilización 300 kg N ha <sup>-1</sup> .....	31
Figura 9 Cobertura de suelo por follaje en %, fertilización 0 kg N ha <sup>-1</sup> .....	33
Figura 10 Cobertura de suelo por follaje en %, fertilización 150 kg N ha <sup>-1</sup> .....	34
Figura 11 Cobertura del suelo por follaje en %, nivel de fertilización 300 kg N ha <sup>-1</sup> .....	34
Figura 12 Cobertura de superficie de suelo por rastrojo, nivel de fertilización 150 kg N ha <sup>-1</sup> .....	36
Figura 13: Promedio ponderado del diámetro de los agregados.....	37
Figura 14 Superficie de grietas (dm <sup>2</sup> ) en diferentes fechas después de la siembra.....	38
Figura 15 Volumen de grietas (m <sup>3</sup> ) en diferentes fechas después de la siembra.....	39
Figura 16: Tiempo de encharcamiento (TE) en segundos.....	40
Figura 17: Comparación de la resistencia a la penetración del suelo .....	43
Figura 18: Humedad gravimétrica (%), profundidad 0 a 15 cm .....	46
Figura 19: Humedad gravimétrica (%), profundidad 15 a 30 cm .....	47
Figura 20: Humedad gravimétrica (%), profundidad 30 a 45 cm .....	48
Figura 21: Humedad gravimétrica (%), profundidad 45 a 60 cm .....	49
Figura 22: Flujo de agua en camas convencionales con incorporación de paja .....	51
Figura 23: Flujo de agua en camas permanentes con quema de paja.....	52
Figura 24: Flujo de agua en camas permanentes con retención de paja.....	53
Figura 25: Tasa de avance en m min <sup>-1</sup> .....	54
Figura 26: Infiltración, como % del total del agua aplicado, .....	55
Figura 27: Lamina de riego aplicada. ....	56

## Índice de cuadros

Cuadro 1: Contenido de humedad de suelo gravimétrico en diferentes profundidades .....	45
Cuadro 2: Infiltración .....	54



## Índice de cuadros del anexo

Cuadro 1a: Abreviaciones .....	66
Cuadro 2a: Cobertura del suelo por follaje (%) .....	67
Cuadro 3a: Cobertura del suelo por rastrojo (%).....	67
Cuadro 4a: Promedio ponderado del diámetro de los agregados (MWD, mm).....	68
Cuadro 5a: Agrietamiento.....	68
Cuadro 6a: Tiempo de encharcamiento .....	69
Cuadro 7a: Resistencia a la penetración del suelo (MPa).....	69
Cuadro del Anexo 8a: Densidad aparente ( $\text{mg m}^{-3}$ ) .....	70
Cuadro 9b: Contenido de humedad del suelo (%) .....	71
Cuadro 10a: Tasa de avance ( $\text{m min}^{-1}$ ) .....	72
Cuadro 11a: Infiltración (en % del agua aplicada) y lámina infiltrada .....	72

## 1 Introducción

Esta investigación es parte de los esfuerzos del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) para desarrollar y evaluar sistemas de producción de agricultura de conservación como alternativa para la producción sustentable de maíz y trigo en zonas agro-ecológicas semiáridas.

Se requiere desarrollar una estrategia para aplicar esta tecnología para hacer un uso más sustentable de los recursos. Globalmente y en regiones específicas, en los últimos años ha ocurrido escasez de agua; México ha sido uno de los países afectados por escasez de agua; cuenta con 6.46 millones ha de bajo riego, siendo uno de los países con mayor superficie agrícola bajo riego en el mundo. La agricultura consume casi 77% del total del agua (Comisión Nacional del Agua, 2008). Al mismo tiempo la disponibilidad *per capita* del agua se está reduciendo (FAO, 2008). En consecuencia, una necesidad es, buscar soluciones para un uso del agua más sustentable.

Para buscar respuesta a esta necesidad, en el Campo Experimental de CIMMYT ubicado en Ciudad Obregón, Sonora, México; en 1992 se estableció un experimento a largo plazo donde se pretenden evaluar diferentes sistemas de labranza de conservación bajo condiciones de riego.

En Sonora se encuentra aproximadamente 11% de la superficie abajo riego de todo México (FAO, 2000). Especialmente el Valle de Yaqui que forma parte de las planicies costeras donde se ubica el Distrito de Riego 041 Valle de Yaqui en la Lat. 27° 40' N and Long. 109° 45' W, y altitud de 38 msnm., se siembra aproximadamente 255,000 ha de superficie bajo riego usando principalmente sistemas de riego de gravedad alimentado por canales (siendo las fuentes de aprovechamiento de agua 80% de escurrimiento superficial y 20% de pozos profundos). La agricultura está mecanizada, el tamaño de las parcelas oscila de menos de 10 a 100 o más hectáreas (ha). Cultivos del ciclo de invierno son trigo (Noviembre-Mayo), cártamo (Enero-Junio), maíz (Septiembre-Febrero), Garbanzo (Diciembre – Abril). Durante el ciclo de verano se cultiva algodón (Febrero – Agosto), maíz (Mayo – Octubre), Sorgo (Marzo – Julio), frijol (Marzo – Mayo)

(Govaerts y Sayre, 2008). El estado de Sonora aporta alrededor del 40% de la producción nacional, la producción de trigo es de importancia nacional, de 1996 a 2006 en promedio se cosecharon 225,078 ha con un promedio de cosecha de de 5.79 ton ha<sup>-1</sup>. En el municipio Cajeme, municipio que abarca una gran parte de la zona agrícola del Valle de Yaqui, se produce el 25% (1999 – 2006) del trigo nacional (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2008).

Por lo anterior, en está investigación se evaluó el aprovechamiento del agua bajo diversos sistemas de producción, los cuales consisten en diferentes prácticas de labranza, manejo de residuos vegetales y niveles de fertilización y sus efectos sobre el cultivo de trigo y el suelo. Se determinaran los sistemas de producción más eficientes con respecto al uso del agua, así como también los factores de los sistemas de manejo que favorecen la formación de características beneficios del suelo que permiten mayor disponibilidad del agua para el cultivo.

# 1 Objetivos e hipótesis

## 1.1 Objetivo general

El objetivo es determinar los factores de los sistemas de producción en agricultura de conservación bajo riego que aumentan el aprovechamiento del agua por el cultivo y los que lo restringen, para poder seleccionar y desarrollar un sistema de producción sustentable de trigo bajo riego.

### 1.1.1 Objetivos particulares

- Evaluar diferentes sistemas de producción respecto al uso eficiente de agua para la producción de trigo bajo riego;
- Evaluar cuales sistemas de producción cuentan con factores que favorecen la formación de características del suelo que permiten una mayor disponibilidad de agua para el cultivo;
- Comparar el desarrollo del cultivo en diferentes sistemas de producción
- Evaluar cuáles factores del sistema de producción tienen mayor importancia, con respecto a la disponibilidad del agua para el cultivo;

## 1.2 Hipótesis

- El uso de agua tiene mayor eficiencia en los sistemas de producción en camas permanentes con retención de rastrojo que en camas de labranza tradicional.
- Las camas permanentes con retención de rastrojo - en comparación a la labranza tradicional- permiten la formación de características físicas en el suelo, las cuales favorecen la disponibilidad del agua para el cultivo.
- El desarrollo del cultivo inicialmente es más lento en camas permanentes en comparación a la labranza tradicional.
- La cobertura con rastrojo es el factor de mayor importancia para la disponibilidad de agua para el cultivo.

## **2 Revisión de literatura**

### **2.1 Agricultura de Conservación**

La agricultura de conservación (AC) es un sistema de producción agrícola de cultivos con un uso sustentable de los recursos naturales. La AC tiene como objetivo asegurar una ganancia estable al productor logrando un rendimiento alto combinado con un impacto mínimo al medio ambiente (FAO, 2008). La AC se basa en tres principios que son: la reducción ó eliminación de la labranza, la retención racional de los residuos de los cultivos en el campo y la práctica cada vez más adoptada de rotación y diversificación de cultivos (CIMMYT, 2006).

La reducción ó eliminación de la labranza se llama “labranza mínima” o “cero labranza”, respectivamente y son alternativas a la labranza convencional. En la labranza convencional el productor trabaja el terreno después de la cosecha con el arado y lo prepara para la siembra con la rastra y/o la cultivadora. En la técnica de la labranza mínima normalmente no se usa el arado, pero si se prepara la cama de siembra. En la cero labranza, no se usa ningún tipo de preparación de terreno. La práctica de reducción ó eliminación de la labranza ha demostrado ser no sustentable sin retención de paja. Por lo anterior un paquete moderno de “cero labranza” siempre debería llevar retención de paja y rotación de cultivo (Ekboir, 2002).

En comparación con sistemas de labranza convencional, la AC presenta varias ventajas económicas, ecológicas y agronómicas. Económicas principalmente en la manera de un ahorro de combustible y trabajo (Brown, 1985). La disminución de uso de combustible también es un beneficio ecológico así como la reducción de la erosión. Entre las ventajas agronómicas, es principalmente el mejoramiento de las características del suelo: por su mayor concentración de nitrógeno mineralizable y carbono, bajo en pH, conductividad eléctrica y porcentaje de sodio intercambiable (Dalal, 1989), mayor estabilidad de agregados (Limon-Ortega et al., 2002), mejora la infiltración (Hawkins et al. 2007), mayor disponibilidad de agua en el suelo (Govaerts et al., 2007), se preserva el tamaño de poros (Moret y Arrué, 2007), se reduce el de escurrimiento (Truman y Rowland, 2005) y el aumento de la macro y mesofauna de

suelo (Chocobar, 2008).

Hasta el momento, principalmente en regiones con agricultura de temporal y en granjas a gran escala, equipadas con maquinaria pesada un cambio de la agricultura convencional a la AC ha sido realizado (Center for Development Research Bonn, 2006). En CIMMYT actualmente se trabaja para una mejor adaptación de la AC para productores de escala mediana y pequeña y también en agricultura en zonas de riego. Mientras la adaptación a escala menor es una adaptación de maquinaria, la adaptación a la agricultura de riego requiere una adaptación de sistema de producción. Una de las principales dificultades para reducir la labranza y la retención de los residuos para riego superficial, está ligada al uso extensivo de siembra en melgas en plano, combinada con sistemas de riego por inundación y riego por surcos que son comúnmente usados a nivel mundial. El riego por inundación conlleva a extremas dificultades en la distribución de agua de riego dentro del campo cuando los residuos se dejan sobre la superficie (Sayre y Hobbs, 2004). En el Valle del Yaqui en el noroeste de México, desde los pasados 25 años, más del 95% de los agricultores de la región han cambiado el uso de la tecnología convencional de riego por inundación en melgas a la tecnología de siembra en camas (Aquino, 1998). Un único surco es sembrado en cada cama para cultivos de hilera como maíz o soya y dos o tres surcos se usan para trigo y otros granos pequeños. Los agricultores que cultivan trigo en camas, obtienen un 8% más de rendimiento y ahorran casi un 25% en los costos de producción, en comparación con los sistemas convencionales de siembra en melgas (Aquino, 1998), además de obtener un ahorro de agua de un 25 a 35 %.

La difundida quema de los residuos del cultivo frecuentemente es acompañada con labranza, aunque algunos residuos son empacados para forraje o incorporados al suelo durante la labranza (Sayre y Hobbs 2004).

Para comparar la práctica común del agricultor (que se basa en una labranza extensiva con la formación de nuevas camas para cada ciclo de cultivo) con prácticas alternativas como el uso de camas permanentes, el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) empezó en 1992 con un ensayo a largo plazo en su estación experimental ubicada en Ciudad Obregón, en el Valle del Yaqui.

Aunque se reportan varios experimentos de AC bajo riego i. e. en China (en Shandong

y Sichuan) y en India (Plano de Indus y Ganges) (Abrol et al., 2005), existe poca literatura sobre AC bajo riego. Se reporta un sistema de algodón en AC bajo riego en Australia, donde se comparó la fertilidad del suelo, la compactación, la extracción del agua, la disponibilidad de nutrientes y el rendimiento son más favorables en camas permanentes respecto a camas convencionales (Hulugalle et al., 1997). En Georgia se reporta una mejor eficiencia en el uso de agua en camas permanentes con un sistema de rotación de cultivos de algodón y maní (Truman y Rowland, 2005), así como en Australia, con una rotación de algodón y trigo una mejor eficiencia en el uso de agua en camas permanentes es notablemente mayor en años secos, que en sistemas convencionales (Tennakoon y Hulugalle, 2006). En la India se reporta un sistema de rotación de arroz y trigo bajo riego con una producción más alta en comparación al sistema tradicional (Singh, 2007).

## **2.2 Eficiencia en el uso del agua**

Existen varios conceptos sobre la relación de agua aplicada y material vegetal obtenido.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization, FAO, por sus siglas en ingles) publica como metodología para el uso de agua en el cultivo (UAC, en ingles: Crop Water Use, CWU ) y su productividad en el cultivo (PAC, Crop water productivity, CWP) diferentes conceptos.

Un concepto básico es la productividad del agua (PA, en ingles: water productivity, WP) que se refiere a la relación de una producción obtenida (producto o servicio) con el insumo de agua (Kassam y Smith, 2001; Bessembinder et al., 2005). La PA también fue utilizada como definición de la cantidad de alimento producido por unidad de agua usada (Viets, 1962). Este concepto abarca un área de influencia más grande, donde se toma en cuenta que el agua, que no ha sido usada en un nivel local, no necesariamente se pierde. Esta agua puede ser por ejemplo aprovechada en otra parcela río abajo (Guerra et al., 1998).

Como derivados resultan la producción del agua en el cultivo (PAC) y la eficiencia en el uso de agua (EUA, en ingles: Water use efficiency, WUE). La FAO define a la PAC como rendimiento de la cosecha por unidad de agua consumida en la

evapotranspiración. La PAC puede ser expresado en cosecha seca o fresca, valor nutritivo o ganancia económica (Kassam y Smith, 2001). Para una productividad mayor de agua los factores mas importantes son el clima, manejo de agua de riego y el estado de fertilidad de suelo (Sander et al., 2004), aunque también la calidad física del suelo, que por ejemplo influye en la capacidad de infiltración, es un factor importante a considerar para un mejor uso del agua.

La eficiencia en el uso de agua (EUA) se define, según la FAO como el agua usada en la evapotranspiración entre la cantidad de agua aplicada (Kassam y Smith, 2001). En este marco la EUA permanece a un nivel de parcela o a un nivel local. Sinclair et al. (1984) sin embargo, la describe en el sentido de la PA propuesto por la FAO: el cual hace referencia a la posible relación de tres factores:

1 Rendimiento expresado por biomasa acumulada medido en: a)  $\text{CO}_2$  asimilado, b) la biomasa total y c) el grano obtenido.

2 Inversión expresada en transpiración, evapotranspiración o aplicación de agua total al sistema

3 Escala de tiempo expresada como instante, día o periodo.

Tennakoon y Milroy (2003) usan la eficiencia en el uso de agua del cultivo (EUAC, en ingles: crop water use efficiency, CWUE) para expresar la cantidad de grano producido en kg por  $\text{m}^3$  de agua evapotranspirada durante el periodo de cultivo.

Según este enfoque, se conocen más conceptos de la EUA. La eficiencia de riego (irrigation efficiency,  $E_i$ ) definida como la eficiencia del agua enfocada en la aplicación de la misma. La FAO aplica la  $E_i$  en su metodología en los niveles de transporte de riego (conducción, como la proporción del agua abastecida por un sistema de suministro de agua general y el agua a disposición del agricultor), la eficiencia en el riego de la parcela (farm irrigation efficiency), como la proporción de la aplicación de agua al campo y el agua disponible en la zona de raíces) y como una eficiencia total de riego que es la proporción del agua abastecida por un sistema de suministro de agua general y el agua en la zona de raíces (Kassam y Smith, 2001).

Por otra parte la  $E_i$  se define como la relación de agua consumida por el cultivo y la cantidad de agua extraída de una fuente (Israelsen et al., 1944). La cual es descrita por la siguiente ecuación:



$$E_i = W_c / W_r \dots\dots\dots 1$$

Donde:

$W_c$  es el agua consumida por el cultivo y  $W_r$  es la cantidad de agua extraída de una fuente de agua.

Debido a que muchos factores influyen a la  $E_i$  Bos (1976) propone una eficiencia en el uso del agua de riego (Irrigation water use efficiency ( $I_{EUA}$ )) la cual toma en cuenta el rendimiento del cultivo con y sin riego, así como el nivel del riego:

$$I_{EUA} = (Y_i - Y_d) / I_i \dots\dots\dots 2$$

Donde:

$Y_i$  es el rendimiento en un nivel de riego „i“,  $Y_d$  es el rendimiento en la misma parcela en temporal y  $I_i$  es el rendimiento en un nivel de riego „i“.

Incluyendo la diferencia entre un sistema de riego y un sistema de temporal (Bos, 1976) describe otra forma de la eficiencia en el uso de agua, donde relaciona la evapotranspiración ( $ET$ ), y el rendimiento con riego y sin riego en la misma parcela.

Descrita con la ecuación:

$$Et_{EUA} = (Y_i - Y_d) / (ET_i - ET_d) \dots\dots\dots 3$$

Donde:

$Y_i$  es el rendimiento y  $ET_i$  la evapotranspiración en un nivel de riego „i“,  $Y_d$  es el rendimiento y  $ET_d$  la evapotranspiración en la misma parcela sin riego. Jensen (2007) menciona que esos términos han servido para describir sistemas, aunque no describen una eficiencia, si no fracciones o coeficientes del consumo de agua, ya que consideran que el agua no utilizada en la parcela se pierde. Para evitar esta inconsistencia Keller propone la eficiencia de riego efectiva (effective irrigation efficiency,  $E_E$ ) que se defina como:

$$E_E = U_{ci} / U_e \dots\dots\dots 4$$

Donde:

$U_{ci}$  es el volumen de agua útilmente usado (net crop ET),  $U_e$  es el agua derivado (uso eficiente (Keller et al., 1996).

### **2.3 Evaluación del riego**

Un riego se puede dividir en cuatro fases hidráulicos que servirán para evaluarlo: avance, avance infiltración, almacenamiento y recesión.

La fase de avance se evalúa con la tasa de avance. Aquí se mide la distancia que el agua de riego avanza en un tiempo dado a lo largo de toda la parcela. Las distancias son de aproximadamente 30 m o menores, según el tamaño del campo. La fase de almacenamiento es el tiempo entre el fin de la fase de avance y el corte de entrada de agua a la parcela. La fase de reducción es el tiempo a partir del corte de entrada de agua hasta cuando deja de correr el agua. La fase de recesión termina en cuando toda el agua superficial ha desaparecido del campo. Aparte de las mediciones de las etapas de riego superficial descritas, la infiltración es un parámetro de gran importancia para el riego (Walker, 1989).

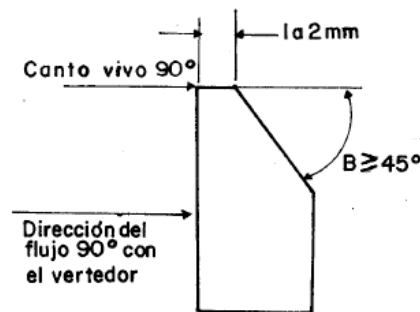
Existen varios métodos para su medición. La literatura reporta en la gran mayoría sobre mediciones en canales de riego y de entrada de agua al campo con diversos instrumentos. Como hay pocas aplicaciones en la AC bajo riego la literatura sobre medición de riego en AC es escasa. Tennakoon y Milroy (2003) reporta la evaluación de un sistema de de AC con una rotación de algodón y trigo. Se uso un vertedor trapecial para medir la salida de agua. Como lo reporta Brown (1985) su uso en un experimento para evaluar los efectos de la paja en riego por surco sobre la infiltración.

En el manual de medición de agua (US Department of Interior, 2001) de la secretaria de Interior de Estado Unidos se da una guía para la selección de un medidor adecuado. Como puntos principales para la selección del medidor se mencionan entre otros los siguientes:

Precisión para la medición del agua aplicada, el costo, las restricciones legales, el rango de tasa de flujo, la diferencia en la altura de caída, posibilidades de adaptación a las condiciones del sitio.

Bos (1976) recomienda para flujos pequeños un vertedor triangular de paredes delgadas como medidor. Se definen los vertedores de paredes delgadas como estructuras hidráulicas que tienen una placa perpendicular a la dirección de corriente con un recorte en forma de 'V'. La cresta deberá ser  $\leq 2$  mm, para permitir que haya

una caída libre de agua. En la Figura 1 se presenta un croquis de la cresta.



**Figura 1: Croquis de la cresta del vertedor, según Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1978**

Estos vertedores tienen una alta exactitud de medición, además abarcan por su forma triangular flujos de diferentes rangos. Su necesidad de diferencia en la altura de caída es adaptable en el campo, que facilita en general sus posibilidades de uso en condiciones de campo. Según el material elegido sus costos son económicos. La carga sobre el vertedor es directamente proporcional al flujo del vertedor (Bos, 1976; Jiwani y Lucas, 2001).

## 2.4 El suelo del área de estudio

El tipo de suelo en la zona estudiada es un Vertisol (Instituto nacional de estadística y geografía 2006). Los Vertisoles son suelos con más que 30% de arcilla. Normalmente se trata de suelos jóvenes, formados en cuencas con pobre desagüe en climas cálidos semiáridos. Dominan las smectitas como grupo mineral, en el campo experimental de Ciudad Obregón en especial las montmorillonita (Limon-Ortega et al., 2005). Esos silicatos resultan en una capacidad alta de intercambio de cationes y un carácter expansivo, tienen un color obscuro y poca materia orgánica (menos que 3%, en el campo experimental de Ciudad Obregón, en promedio de 1.53%, (en 2000). Los Vertisoles son difíciles de trabajar, porque cuando están secos están muy duros, mientras que cuando están húmedos están muy pegajosos, así que la ventana para trabajarlos es muy pequeña (Schachtschabel et al., 1998). Su alto contenido de montmorillonita resulta en una alta capacidad de contracción. Existen tres tipos

principales o fases de contracción (Bronswijk, 1991; Holmes, 1955; Lauritz, 1948). Contracción estructural: ocurre cuando el agua es removida de los poros grandes en un suelo saturado, sin causar cambios en el volumen, produciendo cambios mínimos en la estructura del suelo.

Contracción normal: ocurre cuando el cambio de volumen en un suelo no saturado, es igual al cambio de volumen de agua perdido

Contracción residual: ocurre cuando la pérdida de agua del suelo con un contenido de humedad baja excede la pérdida de volumen y aire entre los poros del suelo y agregados

Una consecuencia de la contracción, resulta en un cambio de volumen de suelo, propiciando la formación de grietas (Flowers y Lal, 1999). Las grietas se forman normalmente desde el punto de contenido de agua más alto en el suelo (Mitchell y van Genuchten, 1992), que normalmente es la zona entre surcos en cultivos en hileras (Flowers y Lal, 1999). Así que para la mayoría de las grietas grandes en cultivos en hileras se encuentran entre los surcos, mientras grietas menores se forman perpendiculares a las grandes, sin cruzar las plantas (Fox, 1964). Fox (1964) y Mitchell y van Genuchten (1992) hablan de una función de esqueleto de las raíces que mantiene el suelo agregado y que ocasiona que la formación de grietas no es resultado únicamente del suelo sino también de la ubicación de las plantas.

La formación de grietas causa varios efectos al suelo. Las características de hincharse y contraerse fuertemente causa una intensiva pedoturbación, que significa que este suelo se está mezclando intensivamente. Cuando se seca, se forman grietas (que pueden ser hasta 2.5 m de profundidad, que se llenan con material superficial; en el campo experimental de Ciudad Obregón se midió hasta 30 cm).

Al remojarse el suelo, causa una presión de expansión. La repetición de este mecanismo causa una mezcla de suelo superficial con suelo de capas más profundas. Como se deshacen los agregados, este mecanismo también se llama "auto-mulching" (Schachtschabel et al., 1998). Durante los ciclos de secado y mojado, se forman "slickensides" (superficies pulidas y ranuradas que aparecen a lo largo de superficies de cortadura), es una de las propiedades que caracterizan a un Vertisol. Aparte de las grietas también pueden mejorar la estructura del suelo, facilitar la infiltración y el

## Revisión de literatura

drenaje, ayudar en la distribución de las raíces, de la materia orgánica y de nutrientes (Dexter, 1986; Dexter, 1991; McGarity et al., 1984; Probert et al., 1987; Skjemstad et al., 1998; Van Noordwijk et al., 1993)

### 3 Materiales y Métodos

#### 3.1 Caracterización del Campo experimental del CIMMYT en Ciudad Obregón, Sonora

El trabajo de campo de esta investigación se hizo en la estación experimental del CIANO (Centro de Investigaciones Agrícola del Noroeste) cerca de Ciudad Obregón, en Sonora, México, en el Valle del Yaqui (Noroeste de México, 34m msnm; 27.33 N, 109.09 W). El tipo de suelo en la estación del CIANO es arcillo arenoso, montmorillonita mezclada tipo Chromic Haplotorrert (Vertisol Calcaric Chromic Novic), bajo materia orgánica (<1%) y ligeramente alcalino (pH 7.7) (Limon-Ortega et al., 2002). El clima se clasifica como subtropical árido. La temperatura anual promedio es de 24.7 °C y el promedio anual de lluvia es 384.1 mm con 253.1 mm en un periodo de lluvia de junio a agosto. La evapotranspiración excede la precipitación en todo el año con un total de 2233.8 mm (1971-2000) (CNA, Servicio Meteorológico Nacional). En la Figura 2 se presentan las normales climatológicas de Ciudad Obregón de 1971 hasta 2000.

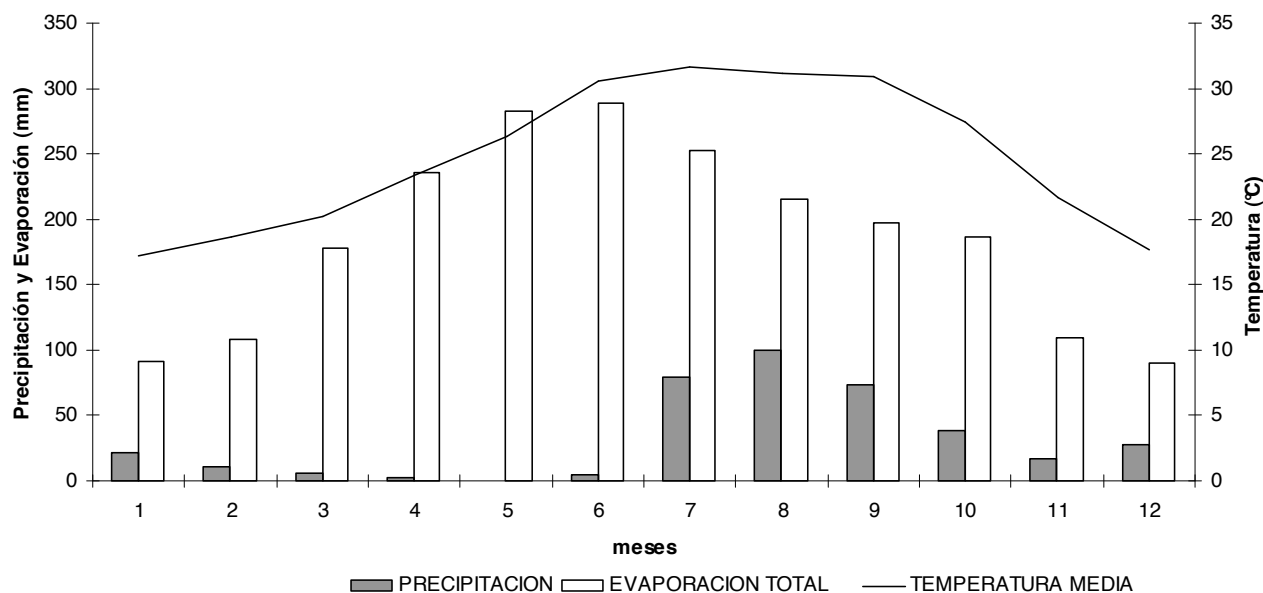


Figura 2: Normales climatológicas de Ciudad Obregón de 1971 a 2000

### 3.2 Descripción del experimento a largo plazo

El experimento se inició en 1992, incluye dos cultivos en rotación anual. Se siembra trigo como cultivo de invierno a finales de noviembre hasta principios de diciembre y se cosecha hasta principio de mayo. Como cultivo de verano sigue maíz, que se cultiva de junio hasta octubre. Los cultivos están sembrados en camas de 0.75 m de ancho. El trigo se siembra en dos hileras con 0.2 m de separación. El maíz se siembra en una sola hilera por cama (Limon-Ortega et al., 2002).

Como control de maleza se aplica después de la siembra un herbicida sistémico no selectivo (08/12/07; Faena Fuerte ®, Ingrediente activo: Glifosato, 3l/ha). Se siembra la variedad de trigo Júpare C2001, una variedad de trigo duro (*Triticum durum* L.) que se caracteriza por su resistencia a la roya de la hoja (*Puccinia recondita*) (Camacho Casas et al., 2002) y es la variedad más común cultivada en México (Herrera-Foessel et al., 2005). La tasa de siembra es de 130 kg ha<sup>-1</sup>. Cada año el trigo y el maíz reciben 45 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> que se coloca en banda en el surco (Limon-Ortega et al., 2002). En el ciclo de invierno 2007/2008 la fecha de siembra fue el 7 de diciembre. La fecha de 50% de emergencia fue el día 14 de diciembre, la fecha de la floración fue el 11 de marzo. En el ciclo se hicieron dos aplicaciones para el control de áfidos (Aflix ®, Ingrediente activo: formothion; 1 l/ha; 16/01/08 y 04/03/08).

Al lado sur del campo experimental se encuentra la toma de agua para regar con tubería con compuertas. El calendario de riego sigue las recomendaciones del Instituto Nacional de Investigación Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Ortiz Enríquez et al., 2003) que recomienda cuatro riegos (riego de presembrado, primer riego de auxilio en la etapa de encañe, segundo riego de auxilio en la etapa de espigamiento-floración, tercer riego de auxilio en la etapa de grano lechoso). El riego de presembrado se realizó el 8 de noviembre 2007, el primer riego de auxilio el 18 de enero 2008 (43 días después de la siembra; estado de planta según Zadok: 22, tallo principal con dos tallos), el segundo riego de auxilio el 15 de febrero 2008 (71 días después de la siembra; estado de planta según Zadok: 45, brote hinchada, tallo principal con dos tallos) y el tercer riego de auxilio el 11 de marzo de 2008 (96 días después de la siembra; estado de planta según Zadok: 69, floración completada) (Simmons et al., 1995). Cada riego tuvo una duración de aproximadamente 12 horas.

El experimento incluye tres repeticiones de cada tratamiento. Los tratamientos se aplican mediante un diseño experimental de parcelas divididas, siendo la parcela grande los tipos de labranza y de manejo de paja, la parcela chica los niveles de fertilización de nitrógeno, con una distribución en bloques al azar con tres repeticiones. Los cinco tratamientos de labranza y de manejos de paja son: (con: CaC para “Camas convencionales” y CaP para “Camas permanentes”):

1. CaC-paja incorporada. Labranza convencional con camas que se forman después de cada cultivo. Los residuos de trigo y maíz son incorporados con el arado.
2. CaP-quema de paja. Cero labranza con una continua reutilización de las camas existentes, que son reformadas tanto como sea necesario. Los residuos de ambos cultivos trigo y maíz son quemados.
3. CaP -paja removida. Cero labranza con una continua reutilización de las camas existentes, que se reforman tanto como sea necesario. Los residuos de ambos cultivos trigo y maíz son removidos para empacarse.
4. CaP -paja parcialmente removida. Cero labranza con una continua reutilización de las camas existentes, que son reformadas tanto como sea necesario. Los residuos de maíz son removidos para empacarse y la paja de trigo se deja en la superficie del suelo.
5. CaP -paja retenida. Cero labranza con una continua reutilización de las camas existentes, que son reformadas tanto como sea necesario. Los residuos de maíz y trigo se dejan en la superficie del suelo.

A esos diferentes tratamientos de labranza y manejo de paja se aplican en el cultivo de trigo siete diferentes tratamientos de fertilizante de nitrógeno al cultivo. El nitrógeno es aplicado como urea al fondo del surco y es incorporado a través del riego.

Los tratamientos de fertilización son:

1.  $0 \text{ kg N ha}^{-1}$
2.  $50 \text{ kg N ha}^{-1}$  basal en banda en el surco y  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  en banda en el surco en la etapa de primer nudo.
3.  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$  basal en banda en el surco.
4.  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  basal en banda en el surco y  $200 \text{ kg N ha}^{-1}$  en banda en el surco



en la etapa de primer nudo.

5. 300 kg N ha<sup>-1</sup> basal en banda en el surco.
6. 150 kg N ha<sup>-1</sup> en banda en el surco en la etapa de primer nudo.
7. 300 kg N ha<sup>-1</sup> en banda en el surco en la etapa de primer nudo.

Para el estudio de la eficiencia del uso de agua se tomó en cuenta los cinco diferentes tratamientos de labranza y manejos de paja con tres tratamientos de fertilización de nitrógeno (0 kg N ha<sup>-1</sup>, 150 kg N ha<sup>-1</sup>, 300 kg N ha<sup>-1</sup>) de aplicación basal.

En la Figura 3 se presenta el croquis del experimento al largo plazo con las ubicaciones de los tratamientos particulares.

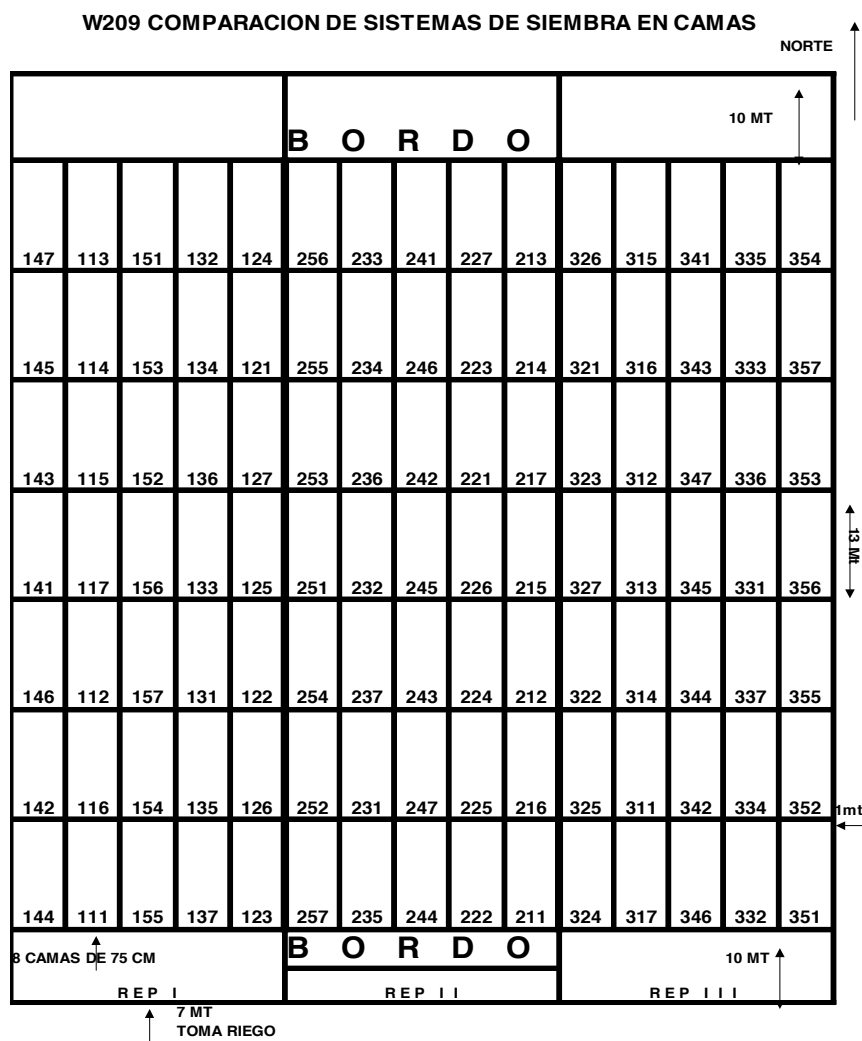


Figura 3: Croquis del lote experimental a largo plazo.

Los números de los tratamientos (XYZ) se codifican con la siguiente nomenclatura: repetición (X, 1-3), tipo de labranza y el manejo de paja (Y, 1-5) y fertilización (Z, 1-7).

### 3.3 Características del cultivo

#### 3.3.1 Índice diferencial de vegetación normalizado

Se usó un medidor de radiación activa en la banda roja e infrarroja cercana marca GreenSeeker™ Unidad de sensor manual óptico (NTech Industries, Inc.) para recabar las mediciones del NDVI. Este implemento utiliza una técnica patentada para medir la reflectancia del cultivo y para calcular el NDVI. El dispositivo del sensor tiene una iluminación propia en la banda roja ( $650 \pm 10$  nm) y la banda del infrarrojo cercano (Near Infrared, NIR,  $770 \pm 15$  nm). El dispositivo mide la fracción de la luz emitida por la superficie y que regresa al sensor (reflectancia). Estas fracciones se usan dentro del sensor para elaborar el NDVI según la siguiente ecuación:

$$\text{NDVI} = \frac{F_{\text{NIR}} - F_{\text{RED}}}{F_{\text{NIR}} + F_{\text{RED}}} \dots\dots\dots 5$$

Donde:

$F_{\text{NIR}}$  = Fracción de NIR emitida y regresada por la superficie registrada.

$F_{\text{RED}}$  = Fracción de la banda roja emitida y regresada por la superficie registrada.

El dispositivo registra una superficie de  $0.6 \times 0.01$  m cuando esta posicionado a una distancia de aproximadamente de 0.6 a 1.0 m encima de la superficie del cultivo. La unidad sensora esta diseñada para ser manejada manualmente (“hand-held”) y las mediciones son tomadas pasando el sensor por la superficie del cultivo. El sensor toma muestras a una tasa alta (aproximadamente 1000 mediciones por segundo) y las promedia por salida. Las salidas del sensor del NDVI están a una tasa de 10 lecturas por segundo. En cada muestreo se tomó una medición sobre las camas y una entre las camas.

Para la medición sobre las camas, el sensor se pasó sobre el cultivo a una altura de aproximadamente 0.8 m sobre la superficie del cultivo y orientado a fin de que a los 0.6 m la anchura estuviera perpendicular al surco y centrado sobre el surco. Se midieron dos secuencias por parcela chica y siempre las mismas dos camas (4ª y 5ª cama). Para la medición entre las camas, se midió el NDVI entre la 4ª y la 5ª cama (tan solo una muestra de la secuencia por parcela dividida), a la misma altura sobre las camas.

En períodos avanzados de crecimiento, la altura del sensor sobre la superficie del terreno se incrementó proporcionalmente. La velocidad del recorrido fue a la velocidad de caminata de aproximadamente 1 m/s que resulta en lecturas de NDVI en promedio sobre las distancias de < 0.10 m con un total de 100 a 150 lecturas individuales de NDVI se registraron por secuencias de muestreo. El promedio del NDVI, la desviación estándar y el coeficiente de variación se calcularon para cada muestra de la secuencia resultando en 4 valores por tratamiento. La medición se hizo aproximadamente dos veces por semana, excepto durante la semana después de un riego, a lo largo del ciclo de cultivo en todas las parcelas

### 3.3.2 Cobertura del suelo por el follaje

La cobertura del suelo por el follaje se estimó visualmente en parcelas con aplicación de fertilizante basal de 0, 150 ó 300 kg N ha<sup>-1</sup>. Se colocó una estaca de 150 cm sobre el terreno bajo el follaje perpendicular a la cama. Se estimó la longitud cubierta por el follaje. La medición se hizo aproximadamente dos veces por semana, a excepción de la semana después de un riego hasta cuando se cerró el cultivo.

### 3.3.3 Cobertura del suelo por rastrojo

Se estimó la cobertura de rastrojo visualmente en las parcelas con aplicación de fertilizante basal de 0, 150 y 300 kg N ha<sup>-1</sup>. Se colocó una estaca de 150 cm perpendicular a la cama sobre el terreno. Se estimó la longitud cubierta por el rastrojo. La medición se hizo cuatro veces durante el ciclo de cultivo (justo antes y después de la siembra, después de 50% de emergencia y alrededor del día 40, 80 y 120 después de la siembra)

## 3.4 Características de suelo

### 3.4.1 Tiempo de encharcamiento (TE)

Se midió el TE dos veces en dos camas por parcela con aplicación de fertilizante basal de 0, 150 o 300 kg N ha<sup>-1</sup>. Se determinó la infiltración directa sobre la superficie marcada con un anillo metálico elaborado con alambre y colocado sobre el terreno (con

un diámetro de 50 cm), pero sin impedir que el agua se saliera de esta área. Se simuló una lluvia, regando con una regadera calibrada hasta 5 l. El agua se aplicó desde una altura de 75 cm con un gasto de  $0.048 \text{ l s}^{-1}$ . Se detuvo el regado cuando el agua empezó a salirse del área marcada. Se registró la filtración directa sobre la superficie y la cantidad de agua añadida al suelo (Govaerts et al., 2006). Se tomaron cuatro mediciones por parcela. La medición se hizo antes del primer riego de auxilio. El TE fue el tiempo que se tardó el agua para salir del anillo.

### 3.4.2 Resistencia a la penetración del suelo

Se midió la resistencia a la penetración del suelo dos veces por parcela chicas con aplicación de fertilizante basal de 0, 150 o 300 kg N ha<sup>-1</sup>. Se midieron la suma de los impactos requeridos para introducir el cono dentro del terreno a intervalos de 15 cm (de 0-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm, 45-60 cm de profundidad). Los impactos se convirtieron en la Resistencia a la penetración (*R*) expresada en MPa usando la siguiente ecuación:

$$R = \frac{NMgSD}{APD} \dots\dots\dots 6$$

Donde:

N es el número de impactos, M la masa de los impactos (5 kg), g aceleración de gravedad, SD distancia de deslizamiento del martillo, A área del cono, PD distancia de penetración (Herrick y Jones, 2002).

Se realizaron las mediciones antes del primer riego de auxilio (en parcelas de 150 kg N ha<sup>-1</sup>) y antes y después de segundo riego de auxilio.

### 3.4.3 Contenido de humedad del suelo

Se midió la humedad del suelo en las parcelas con aplicación de fertilizante basal de 0, 150 kg y 300 kg N ha<sup>-1</sup>. Se tomaron dos muestras por parcela a 0-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm, 45-60 cm y se mezclaron para obtener una muestra compuesta. Después del pesado, las muestras se secaron durante 48 horas a 105°C y se determinó el peso seco. La siguiente ecuación se utilizó para obtener el contenido de humedad gravimétrica por muestra (White, 2005):

$$\text{moisture}_{\text{gravimetric}} = \frac{m_{\text{wet}} - m_{\text{dry}}}{m_{\text{dry}}} 100 \dots\dots\dots 7$$

Donde:

$m_{\text{wet}}$  es el peso del suelo húmedo y  $m_{\text{dry}}$  el peso seco del suelo. Se determinó el contenido de humedad volumétrica al multiplicar el contenido de humedad gravimétrica por la respectiva densidad aparente (White, 2005). La densidad aparente fue en promedio de  $1.2 \text{ mg m}^{-3}$  en la profundidad de 0 a 15 cm, de  $1.4 \text{ mg m}^{-3}$  en la profundidad de 15 a 30 cm, de  $1.5 \text{ mg m}^{-3}$  en la profundidad de 30 a 45 cm y de  $1.5 \text{ mg m}^{-3}$  en la profundidad de 45 a 60 cm. Las mediciones se hicieron un día antes de cada riego, una semana después del riego en parcelas con aplicación de fertilizante basal de 0 y  $300 \text{ kg de N ha}^{-1}$ . Una vez más entre los riegos se hizo una medición entre el riego de presiembra y el primer riego de auxilio en parcelas con aplicación de fertilizante basal de 0 y  $300 \text{ kg N ha}^{-1}$ . Cada semana las mediciones se hicieron en parcelas con aplicación de fertilizante basal de  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$ .

#### 3.4.4 Agrietamiento

El agrietamiento se midió según un método adaptado de (Bandyopadhyay et al., 2003) en parcelas de tratamientos de fertilización basal de  $\text{kg N ha}^{-1}$  y tratamientos de CaC-paja incorporada y CaP-paja retenida. Se hicieron dos mediciones por parcela, cada una en una área de  $0.75 \times 1.00 \text{ m}$ , correspondientes al surco 3 de la cama 4 y otra al surco 5 de la cama 6. Cada grieta con profundidad de  $\geq 2 \text{ cm}$  y un ancho  $\geq 2 \text{ mm}$  se midió la longitud superficial, la profundidad y el ancho.

La longitud superficial de la grieta del suelo medió con un hilo guiado a lo largo de la grieta (Dasog y Shashidhara, 1993).

La profundidad promedio de la grieta se medió cada 10 cm a lo largo de la grieta con una barrilla metálica de 2 mm de diámetro la cual se insertaba hasta que presentara más resistencia a penetración.

El ancho promedio y la profundidad de la grieta se midió en el mismo punto con un Vanier a una profundidad de 1 cm abajo del nivel de suelo (Dasog et al., 1988). Se eligió un centímetro de profundidad para evitar la influencia de la perturbación de la

superficie.

El volumen total ( $V$ ,  $m^3$ ) y la superficie del área ( $AS$ ,  $m^2$ ) de cada grieta se calcularon utilizando las siguientes ecuaciones asumiendo una forma triangular de las grietas (Sharma, et al.1995):

$$V = \sum 0.5w d l \dots\dots\dots 8$$

$$AS = \sum 2Cl \dots\dots\dots 9$$

$$C = [(0.5w)^2 + d^2]^{1/2} \dots\dots\dots 10$$

Donde:

$w$  es la anchura principal de las grietas (m),  $d$  la profundidad principal de la grieta (m),  $l$  la longitud de la grieta (m), y  $C$  el parámetro basado en los parámetros  $w$  y  $d$ .

Las mediciones se hicieron a los 117 días después de la siembra (en los manejos de CaC-paja incorporada y CaP-paja retenida) y 127 después de la siembra (en los manejos CaC-paja incorporada, CaP-quema de paja y CaP-paja retenida).

#### 3.4.5 Elasticidad del Suelo (Medido solo en suelo a 0-5 cm)

Se aplicó el método propuesto por Day (1965). Se tomaron muestras en ocho puntos, cuatro por cama (en la cama 3 y 6), de 0 a 5 cm de profundidad. Las muestras fueron secadas al aire luego tamizadas a 2 mm.

A 25 g de muestra de suelo se agregó 30 ml de agua destilada. El suelo mojado fue mezclando por aproximadamente 1 min hasta que se obtuvo una mezcla homogénea. Las muestras fueron secadas al horno por 72 h a 40°C. La distribución por tamaño de los agregados formados fue determinado (utilizando tamices de 8.00, 4.00, 2.00, 1.00, 0.50, 0.25 mm con un agitador mecánico) fue expresado como diámetro geométrico promedio de los agregados de suelo (geometric mean diameter, GMD) (Gee y Bauder, 1986). En el caso que los agregados excedieran el tamaño del tamiz, se midió la distancia de los lados opuestos lo menos alejados con un vernier.

Se calculó del promedio ponderado del diámetro (mean weight diameter, MWD) como la suma de productos de la proporción del peso total ( $w_i$ ) y el diámetro promedio de los agregados ( $X_i$ ):

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i \dots\dots\dots 11$$

### 3.5 Mediciones de riego

#### 3.5.1 Desarrollo de un método para evaluar el riego a nivel de parcelas experimentales

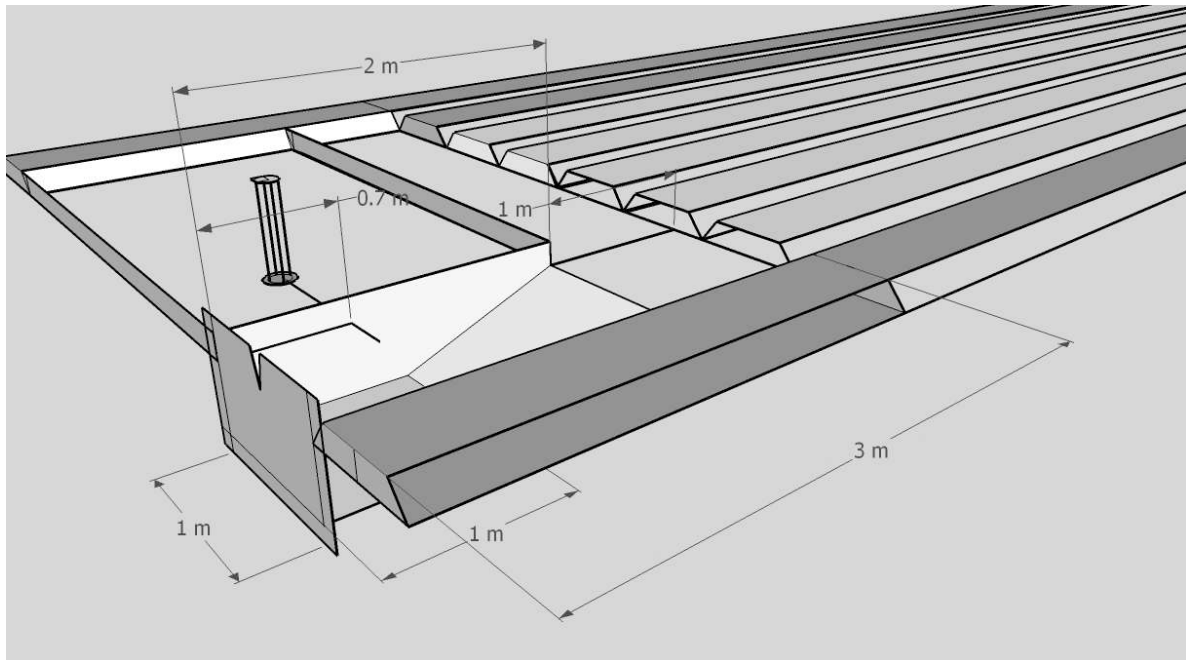
Tomando en cuenta el requerimiento de precisión para medir el agua aplicada, los costos, el rango de la tasa de flujo, la diferencia en la altura de caída y la posibilidades de adaptación a las condiciones del sitio, en los cuatro riegos que se aplicaron, por el método de prueba y error se fue adaptando el sistema de medición del riego a las condiciones de la parcela. Objetos de observación: fueron manera de la instalación medidores (vertedores de cresta triangular), así como la ubicación y la frecuencia de las observaciones.

En el riego de pre-siembra se hicieron en promedio diez mediciones (incluyendo repeticiones) a la entrada del agua en tres sitios por repetición. Se observó que una cantidad significativa de agua de riego escurría al final de la parcela resultando la necesidad de combinar la medición a la entrada con una medición a la salida.

En el primer riego de auxilio se hicieron en promedio 17 mediciones de la entrada de agua en tres ubicaciones por repetición. Por razones de no arriesgar el experimento con una influencia sobre el desarrollo del cultivo se hizo una instalación del medidor a la salida de agua en una parcela auxiliar con el mismo manejo. En el primer riego de auxilio en un campo experimental vecino con condiciones similares se probó en cuatro ubicaciones la siguiente instalación para la medición de la salida de agua:

Se construyó un canal colector perpendicular a los nueve surcos de un manejo de labranza y retención de paja con un ancho de 1 metro (del fin de la cama hasta el bordo del canal),

Un pileta tranquilizadora de dos metros de largo y un metro de ancho y que ligó el canal colector con el canal de desagüe. En el ultimo metro antes del vertedor se hizo un excavación de aproximadamente 40 cm de profundidad. En la Figura 4 se presenta un croquis del arreglo en el campo.

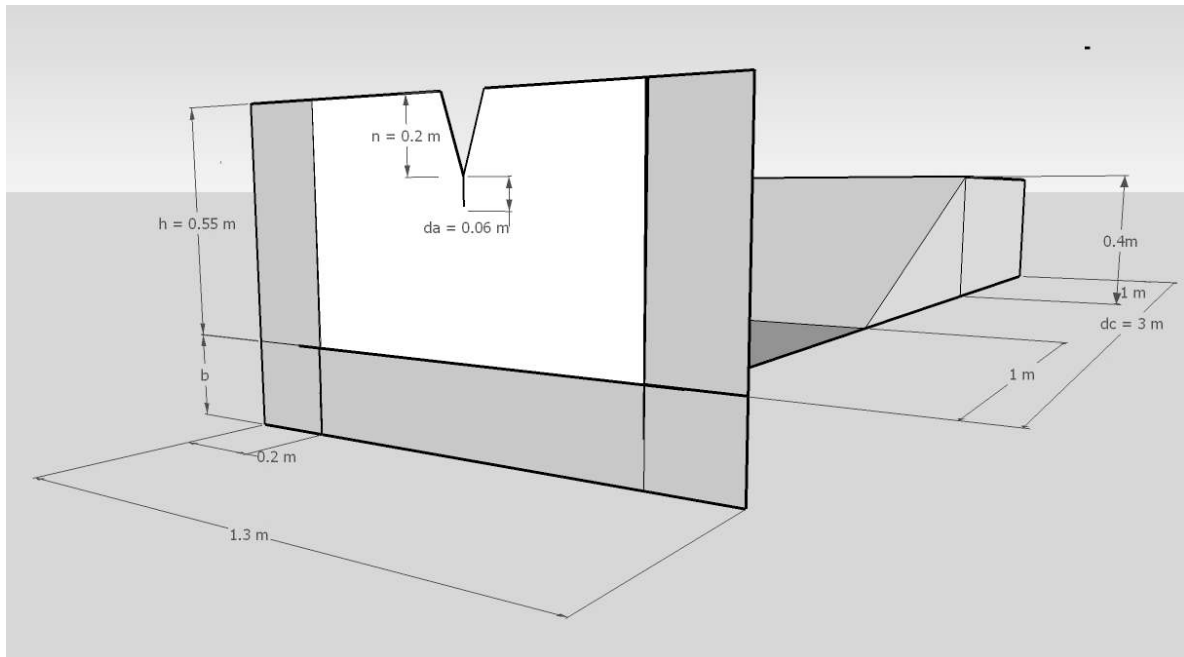


**Figura 4** Ajuste del vertedor en el campo.

Un vertedor de medición fue hecho de una tabla de madera con un ancho de 1.3 m y 0.55 m de altura y pintado para repelar el agua. Para asegurar la medición exacta y cumplir con requisito de paredes delgadas a una escotadura triangular de 20 x 30 cm en medio de la parte arriba se colocó una lámina metálica con escotadura con un ángulo de 25°.

Para medir la carga sobre el vertedor fue instalado un dispositivo de medición basado en el principio de los vasos comunicados consistiendo en una probeta de un litro y un tubo PVC como conexión entre el depósito y la probeta. El tubo fue posicionado lateralmente por fuera en la pileta a una distancia de 0.4 m antes de vertedor y la conexión del vaso comunicante se hizo a una distancia de 5cm abajo de la escotadura del vertedor. En la Figura 4 se presenta un croquis del vertedor.





**Figura 5: Croquis del vertedor. Donde a es el ancho de la compuerta, b la profundidad en que la compuerta esta enterrado, h la altura de la compuerta, de la distancia mínima entre el punto del entallado de la compuerta y el nivel de agua en el desagüe.**

El canal colector y la pileta fueron construidos en un día laboral entre cinco personas con herramientas. Las compuertas que se usaron tenían un costo de \$ 150.00 por pieza. La instalación de la compuerta y la compuerta misma cumplieron con el objetivo de hacer mediciones exactas, incluyendo una descarga libre del vertedor. Aún se observó un embalse por refluo que se considero como critico por lo que se decidió modificar el ángulo de la escotadura del vertedor a 30°.

En el segundo riego de auxilio se usó el mismo diseño de los canales y el vertedor modificado. Se hicieron 32 mediciones/repeticón de entrada y de salida en tres lugares. Observando un buen funcionamiento se aplicó el mismo material y las mismas construcciones.

En el tercer riego de auxilio, como en la evaluación del segundo riego la entrada del agua osciló notablemente durante casi todo el tiempo de riego por lo que hubiera necesidad de aumentar las mediciones de entrada de agua. Por la observación que la entrada de agua varió en el tiempo y a lo largo de la tubería de compuertas se hicieron más que 100 mediciones en 14 entradas de agua por parcela. A la salida se hicieron

mediciones al final de seis parcelas donde un total de casi 400 mediciones durante el riego.

### 3.5.2 Entrada de agua

La entrada de agua se midió según Walker et al. (1987) con botes de plástico calibrados a cada litro y se midió al inicio de los surcos en los sistemas de manejos CaC-paja incorporada, CaP-quema de paja y CaP-paja retenida. Se colocó el bote abajo del orificio de la tubería de compuertas correspondiente al surco. Se registro el tiempo hasta que el volumen de agua en el bote alcanzó 5 l y el gasto de entrada se calculó. Se hicieron tres repeticiones de la medición en cada punto. El volumen de agua aplicada se calculó multiplicando el gasto hidráulico de entrada por el tiempo de duración del riego por el número de los nuevos surcos de cada parcela con la siguiente ecuación:

$$V = Q * t \dots\dots\dots 12$$

Donde:

V = Volumen (m<sup>3</sup>), Q = gasto hidráulico (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) y t = tiempo (s).

### 3.5.3 Salida de agua

Se midió la salida por parcela grande (8 surcos) de los tratamientos CTB-paja incorporada, PB-quema de paja y PB-paja retenida, con un vertedor triangular de pared delgada como medidor. La descarga se calculó con la ecuación de Kindsvater-Shen (US Department of Interior, 2001).

$$Q = 4.28C_e \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)(h + k)^{\frac{5}{2}} \dots\dots\dots 13$$

Donde:

Q = gasto hidráulico (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>), C<sub>e</sub> = coeficiente efectivo de descarga, h es = carga sobre la cresta del vertedor (cm), k es el factor de corrección (dado en tabla: vea (US Department of Interior, 2001 o Anexo de Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1978) y θ es el ángulo de la escotadura en forma de “V”. Los factores k y C<sub>e</sub> se calculan con las siguientes ecuaciones (LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd., 2007).

$$C_e = 0.607165052 - 0.000874466963\theta + 6.10393334 \times 10^{-6} \theta^2 \dots\dots\dots 14$$

$$k(ft) = 0.0144902648 - 0.00033955535\theta + 3.29819003 \times 10^{-6} \theta^2 - 1.06215442 \times 10^{-8} \theta^3 \dots\dots 15$$

### 3.5.4 Tasa de avance

La tasa de avance se midió según Walker & Skogerboe (1987) en los tres surco centrales en CaC-paja incorporada, CaP-quema de paja y CaP-paja retenida. Se midió el tiempo que el agua tardo en llegar aproximadamente hasta la mitad y hasta el fin de la parcela. El punto hasta donde había llegado el frente de riego se registró el tiempo y se marco con una bandera numerada para medir la distancia de avance después del riego. La tasa de avance se calculó dividiendo la distancia de avance entre el tiempo requerido para alcanzar dicha distancia.

### Infiltración

La infiltración se calculó según la ecuación siguiente:

$$\frac{V_{\text{entrada}} - V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}} = \%V_{\text{infiltrado}} \dots\dots\dots 16$$

Donde:

$V_{\text{entrada}}$  es el volumen de la entrada de agua a la parcela grande,  $V_{\text{salida}}$  es el volumen de la salida de agua de la parcela grande y  $\%V_{\text{infiltrado}}$  es el porcentaje del volumen de agua infiltrado del agua total de agua la entrada de agua a la parcela grande.

## 4 Resultados

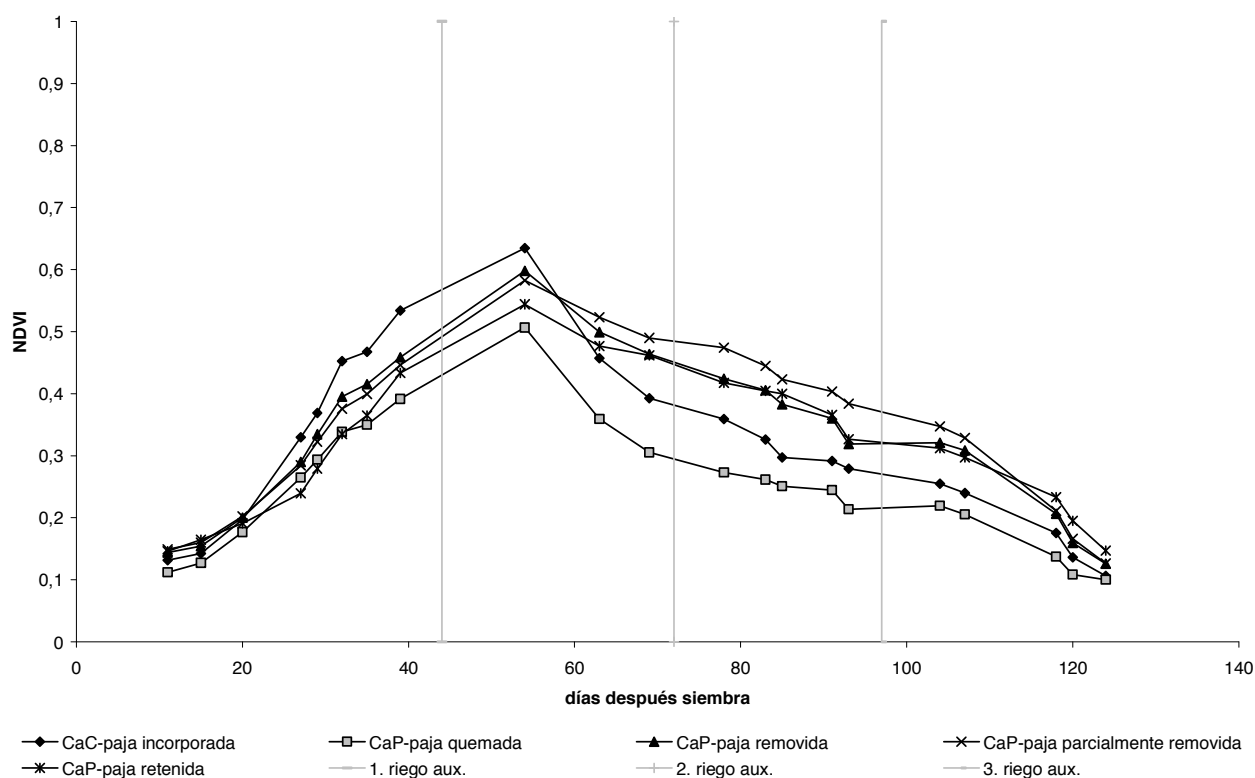
### 4.1 Desarrollo del cultivo

#### 4.1.1 Índice diferencial de vegetación normalizado

El NDVI de parcelas del nivel de fertilización de  $0 \text{ kg N ha}^{-1}$  se presenta en la Figura 6. En este nivel de fertilización antes del primer riego de auxilio, la medición del NDVI resultó con un valor significativamente más alto en CaC-paja incorporada que en los demás manejos. CaP-paja removida, CaP-paja parcialmente removida y CaP-paja retenida tienen valores de NDVI significativamente más alto que el manejo de CaP paja quemada. En la primera medición después del primer riego de auxilio, que coincide con el momento en que el cultivo alcanza su mayor valor de NDVI, CaC-paja incorporada sigue siendo el manejo con el valor más alto del NDVI, con una diferencia significativa respecto a CaP-Paja quemada, CaP-paja parcialmente removida y CaP-paja retenida. CaP-paja quemada, sigue siendo el manejo que presentó el valor mas bajo de NDVI durante el resto del ciclo. No obstante después de llegar a su máximo, el NDVI en CaC-paja incorporada decreció rápidamente.

Antes del segundo riego de auxilio CaP-paja parcialmente removida es el manejo con el valor de NDVI más alto y sigue siendo hasta justo antes de la madurez.

Después del tercer riego de auxilio hay diferencias significativas entre CaP-paja removida y Cap-paja parcialmente removida con CaC-paja incorporada y CaP-paja quemada, en donde los primeros dos resultan tener valores más altos. También CaP-paja retenida tiene un valor significativamente más alto que CaP-paja quemada. En la última medición CaP-paja retenida tiene el valor significativamente más alto comparado con los demás manejos. Los manejos de CaC-paja incorporada y CaP-paja quemada tienen valores significativamente menores que los demás manejos.



**Figura 6: NDVI de parcelas con nivel de fertilización  $0 \text{ kg N ha}^{-1}$ , CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes; riego aux. = riego de auxilio**

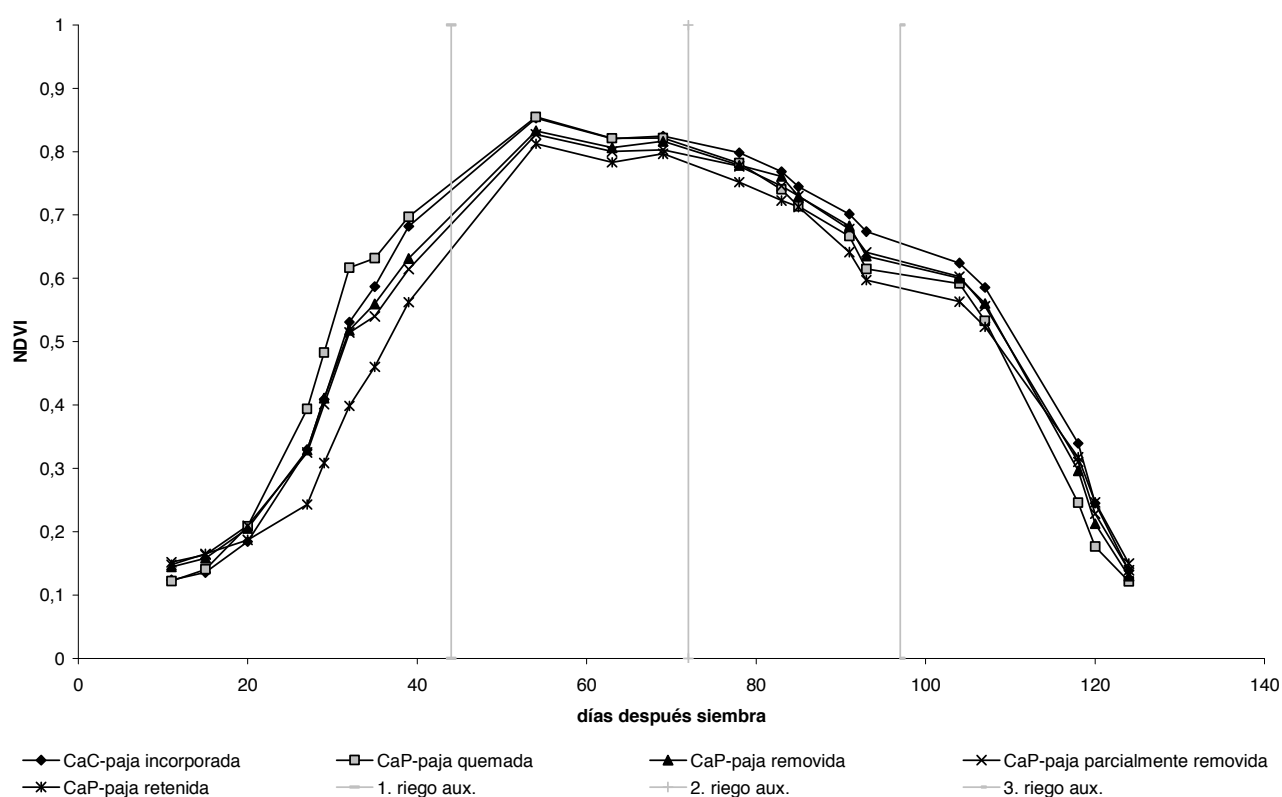
El NDVI de la parcela del nivel de fertilización de  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$  se presenta en la Figura 7. Antes del primer riego de auxilio hay una diferencia significativamente entre CaC-paja incorporada y CaP-paja quemada con respecto a los manejos de camas permanentes sin quema, que resultan con valores menores. CaP-paja removida y CaP-paja parcialmente removida resultan con valores significativamente mayores a los del CaP-paja retenida, que presenta el valor más bajo de NDVI de todos los manejos.

Después del mismo riego, que es el momento en que se llega al mayor valor de NDVI también en este nivel de fertilización, CaC-paja incorporada y CaP-paja quemada siguen siendo los manejos significativamente más altos en comparación con los demás manejos. CaP-paja removida es significativamente mayor en el valor de NDVI a CaP-paja retenida, que sigue siendo el manejo con el valor más bajo.

Antes del tercer riego de auxilio CaC-paja incorporada tiene un valor significativamente mayor que los demás manejos. CaP-paja removida y CaP-paja parcialmente removida

tienen un valor de NDVI significativamente mayor que CaP-paja retenida.

Después de este riego CaC-paja incorporada sigue con el valor de NDVI significativamente mayor a los demás manejos. En el grupo de camas permanentes, todos resultan con un valor de NDVI significativamente mayor a CaP-paja retenida. En la última medición CaP-paja retenida tiene el valor más alto y significativamente mayor a de CaP-paja quemada.



**Figura 7 NDVI de parcelas con nivel de fertilización 150 kg N ha<sup>-1</sup>, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes; riego aux. = riego de auxilio**

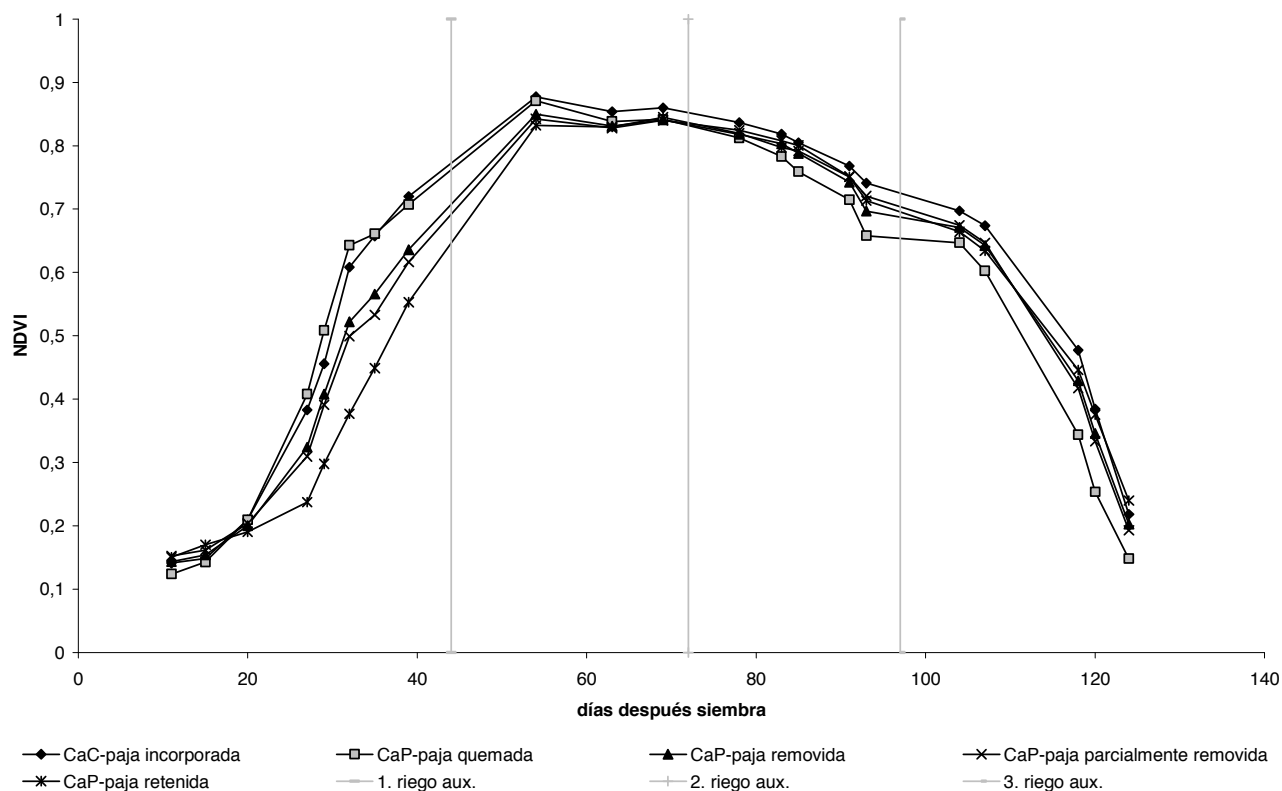
En la Figura 8 se presentan los datos del NDVI de los manejos en el nivel de fertilización de 300 kg N ha<sup>-1</sup>. Antes del primer riego CaC-paja incorporada y CaP-paja quemada tienen los valores de NDVI significativamente mayores comparado con los demás manejos. CaP-paja removida y CaP-paja parcialmente removida tienen el valor de NDVI significativamente mayor a CaP-paja retenida, que es el manejo con el valor

mas bajo de NDVI. Después de este riego se mantiene una situación similar pero con la diferencia que en este momento ya no hay una diferencia significativa entre CaP-paja parcialmente removida y CaP-paja retenida.

Antes del segundo riego de auxilio CaC-paja incorporada sigue siendo el manejo con el mayor valor de NDVI igual como antes y después del tercer riego., significativamente mayor a los manejos de CaP-paja quemada, CaP-Paja removida CaP-paja parcialmente removida y CaP-paja retenida. Esta situación se mantiene también después de este riego con la diferencia que CaP-paja quemada presentan un valor de NDVI significativamente menor también al manejo Cap-paja parcialmente removida.

Antes del tercer riego CaP-paja parcialmente removida tiene un valor de NDVI significativamente mayor que CaP-paja removida y CaP-paja quemada. CaP-Paja removida y CaP-paja retenida tienen valores de NDVI significativamente mayor al manejo de CaP-paja quemada, que resulta ser el manejo con el valor de NDVI más bajo. Después del tercer riego de auxilio CaP-paja quemada tiene un valor de NDVI significativamente menor en comparación de CaP-Paja removida CaP-paja parcialmente removida y CaP-paja retenida.

En la ultima medición CaP-paja retenida tiene un valor de NDVI significativamente mayor a los demás manejos. CaC-paja incorporada tiene un valor del NDVI significativamente mayor a CaP-paja parcialmente removida y CaP-paja quemada. Entre los dos últimos CaP-paja, parcialmente removida resulta con un valor de NDVI significativamente mayor.



**Figura 8 NDVI de parcelas con nivel de fertilización 300 kg N ha<sup>-1</sup>, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes; riego aux. = riego de auxilio**

Como el NDVI incluye reflectancia en la banda roja así como en la banda del infrarrojo cercana, es un buen índice para predecir la actividad fotosintética. A su vez la actividad fotosintética es determinada por el contenido y actividad fotosintética (Govaerts et al., 2007). Evans (1989) demostró la relación entre el nitrógeno de la hoja y de la clorofila de la hoja. Aún el NDVI tiene que ser considerado como un índice que refleja varios factores de crecimiento (Govaerts et al., 2007).

En el nivel de fertilización 0 kg N ha<sup>-1</sup> el cultivo en el manejo de CaC-paja incorporada tenía un crecimiento inicial mucho más rápido que los demás manejos. Posiblemente la preparación del suelo para la siembra facilitó la movilización de nutrientes para el desarrollo inicial del cultivo. Pero a rededor de 53 días después de la siembra empieza una disminución rápida del NDVI, que implica un tiempo menor de acumulación de biomasa. El manejo de CaP-paja quemada presenta el peor desarrollo, mientras los manejos de CaP-paja removida, CaP-paja parcialmente removida y CaP-paja retenida



permanecen con un NDVI alto por más tiempo, que indica una mejor acumulación de biomasa.

En el nivel de fertilización  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$  se observe un comportamiento similar del cultivo el manejo de CaC-paja incorporada, aún menos estacado. El manejo de CaP-paja retenida no logra resultados de NDVI como los demás. Las razones pueden ser externas ya que en este ciclo más paja y más humedad de la misma dificultaron una siembra uniforme.

En el nivel de fertilización  $300 \text{ kg N ha}^{-1}$  también dispara el desarrollo del manejo de CaP-paja quemada. Los razones deben ser similares a los en el nivel sin fertilización. Un buen contacto entre semilla y suelo facilitó el desarrollo inicial, aún mas que en suelos con paja quemada hay una mayor disponibilidad de nitrógeno (Blank et al., 2007) que da una ventaja en el crecimiento al inicio al cultivo en el manejo de CaP-paja quemada. Pero esta disponibilidad de N por quema de biomasa también aporta a un incremento de gases del efecto invernadero (LEvine, 1991).

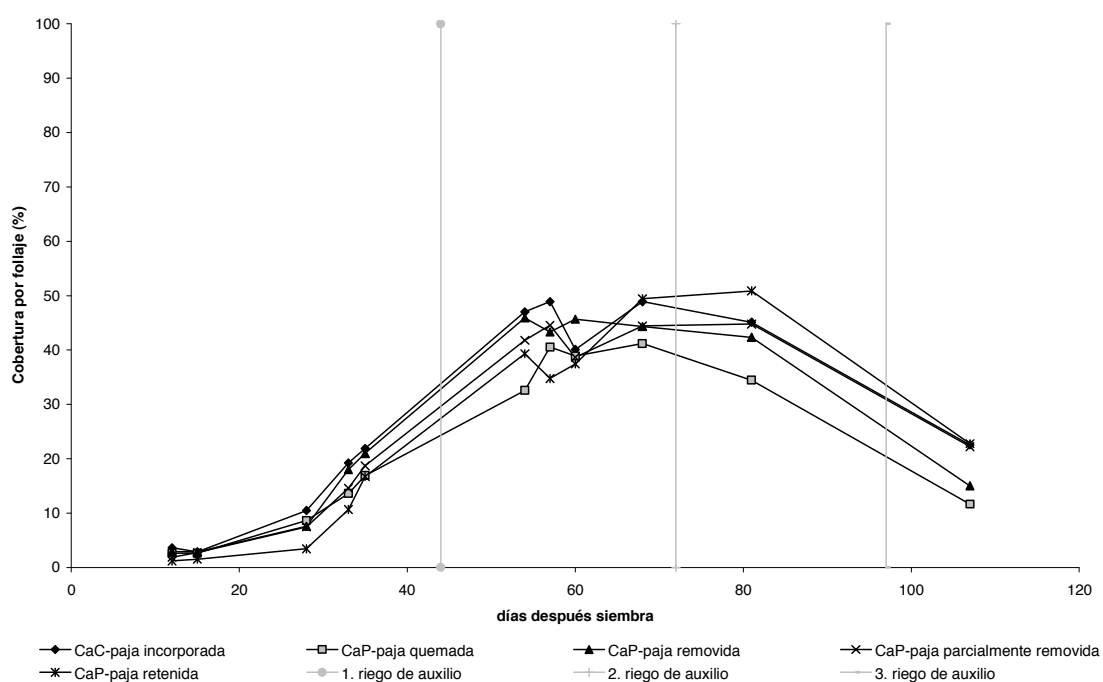
En general los resultados obtenidos son similares a los de Govaerts et al. (2006) en el mismo sitio y de Govaerts et al. (2007), que se obtuvieron en un sistema bajo temporal.

#### 4.1.2 Cobertura del suelo por el follaje

La cobertura del suelo por el follaje se presenta de la Figura 9 a la Figura 11. Se observa en general un aumento de la cobertura del suelo por follaje, inicialmente hasta alrededor de día 28 después de la siembra (Inicio de brote principal). A partir de este momento se observó un aumento rápido de la cobertura del suelo por follaje hasta alrededor el día 60 después de la siembra (emergencia de la espiga). De aquí sigue otra fase de un aumento mas lento hasta alrededor el día 80 después de la siembra (Comienzo de la floración). A partir de este momento inició a declinar la cobertura del suelo por el follaje nuevamente. Los tres manejos de fertilización observados siguen en su desarrollo la curva descrita, aún que en los manejos con  $0 \text{ kg N ha}^{-1}$  la curva se presenta mucho mas plana y no logra mas que un 50% de cobertura en el clímax, mientras los manejos con  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$  llega a un cobertura entre 87 (CaP-paja removida) y 92% (CaP-paja parcialmente removida y CaP-paja retenida) y los manejos con  $300 \text{ kg N ha}^{-1}$  a un cobertura entre 89% (CaP-paja retenida) y 97% (CaC-paja

incorporada).

Al rededor de la floración, en el momento de la mayor cobertura por follaje se presentan en el nivel de fertilización de 0 kg N ha<sup>-1</sup> se observan diferencias significativas entre CaP-paja retenida y CaP- quema de paja (que tiene la menor cobertura). En el nivel de fertilización de 150 kg N ha<sup>-1</sup> no se encuentran diferencias significativas entre los diferentes manejos, mientras en el nivel de fertilización de 300 kg N ha<sup>-1</sup> CaC-paja incorporada tiene una cobertura significativamente mayor en comparación con CaP-retenida.



**Figura 9 Cobertura de suelo por follaje en %, fertilización 0 kg N ha<sup>-1</sup>, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes**

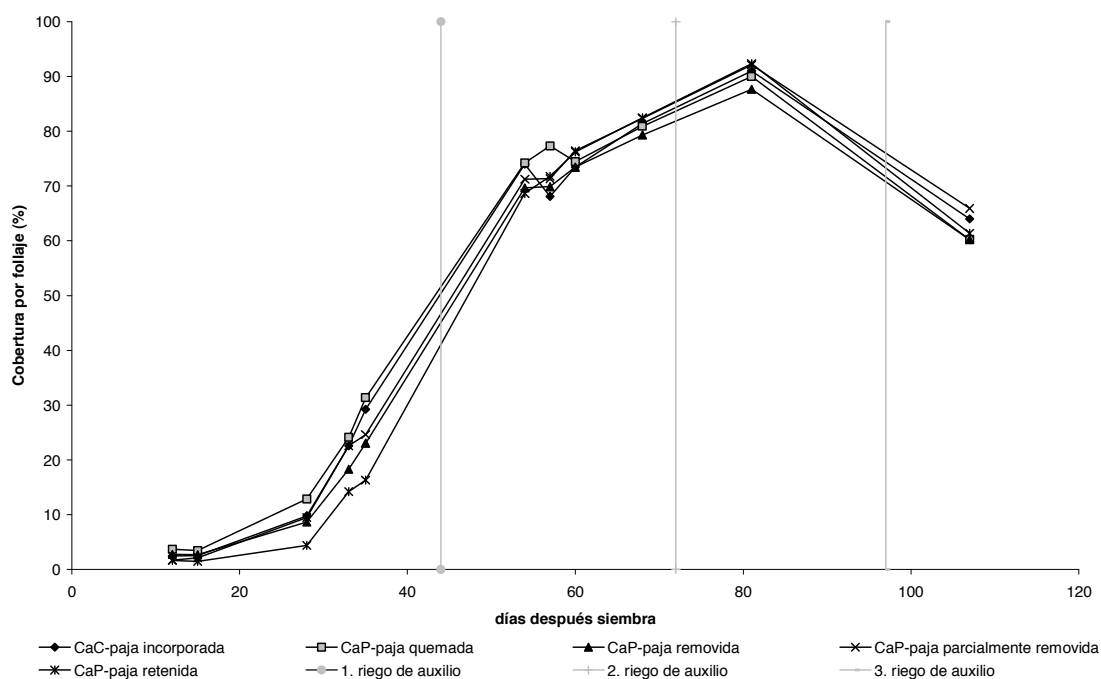


Figura 10 Cobertura de suelo por follaje en %, fertilización 150 kg N ha<sup>-1</sup>, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes

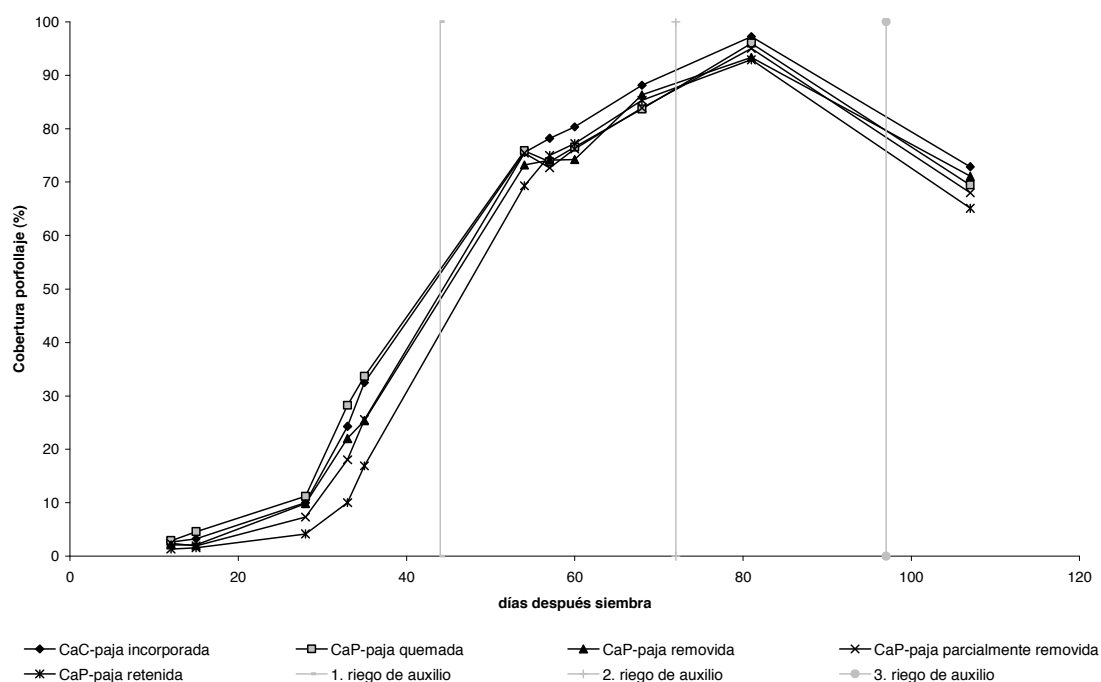


Figura 11 Cobertura del suelo por follaje en %, nivel de fertilización 300 kg N ha<sup>-1</sup>, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes.

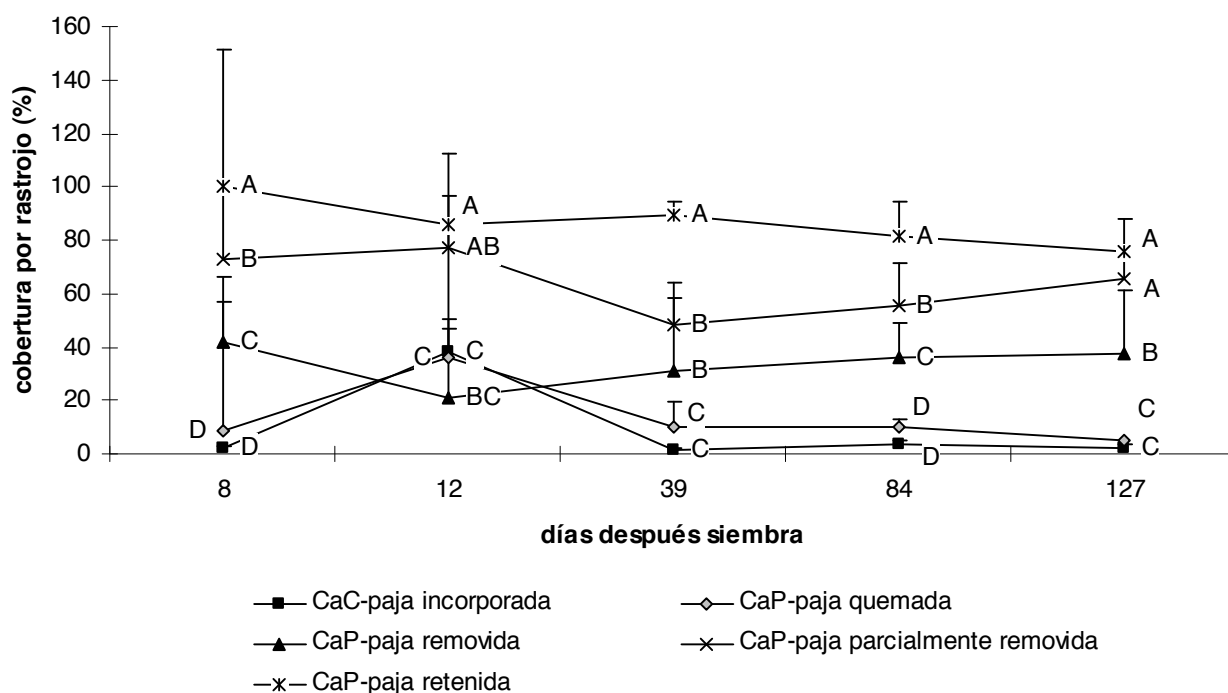
La cobertura del suelo por follaje en los diferentes niveles de fertilización confirman los resultados de las mediciones del NDVI. Por ser menos precisas las diferencias entre los manejos en esta medición son menos obvias.

## 4.2 Suelo

### 4.2.1 Cobertura del suelo por rastrojo

En la Figura 12 se presenta el desarrollo de la cobertura del suelo por el rastrojo en las parcelas de nivel de fertilización  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$ . Los resultados entre los diferentes niveles de fertilización fueron similares. Durante toda la temporada CaP-paja retenida tenía un porcentaje de cobertura significativamente mayor a los demás manejos. En la primera medición (ocho días antes de la siembra) CaP-paja quemada y CaC-paja incorporada tenían un porcentaje de cobertura significativamente menor a los demás manejos. En la segunda medición (doce días después de la siembra) CaP-paja removida tenía un valor significativamente menor en comparación a CaP-paja retenida y CaP-paja parcialmente removida. En la tercera medición (39 días después de la siembra), CaP-paja quemada y CaC-paja incorporada tenían un porcentaje de cobertura significativamente menor a los demás manejos. Las mediciones 84 días y 127 días después de la siembra resultaron en las mismas relaciones como la tercera medición.

Rastrojo consiste principalmente de residuos vegetales como tallos, hojas y raíces. (Follett et al., 1987). La cobertura de rastrojo esta considerado como un recurso importante natural para conservar y mejor el suelo (Langdale et al., 1994). La cobertura del suelo por rastrojo disminuye la evaporación y favorece de esta manera la conservación de la humedad del suelo (Gupta et al., 1983; Scopel et al., 2004) y aumenta la el agua disponible para el cultivo (Tolk et al., 1999).



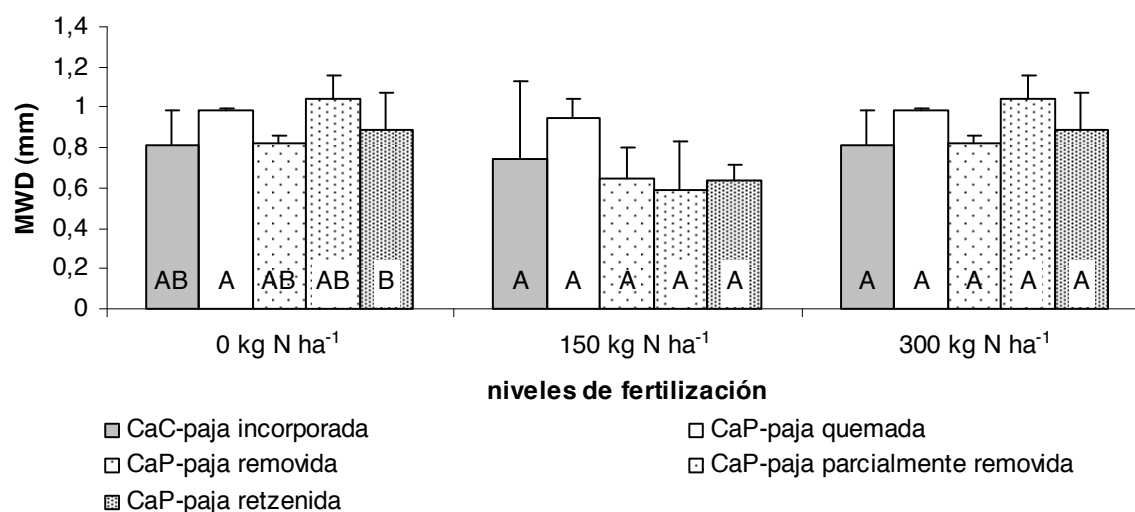
**Figura 12 Cobertura de superficie de suelo por rastrojo, nivel de fertilización 150 kg N ha<sup>-1</sup>**  
**CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes, letras idénticas en una medición significan que no hay diferencia significativas entre los manejos.**

Como consecuencia de la práctica, los manejos de CaP-paja retenida y CaP-paja parcialmente retenida en cuatro de cinco mediciones tienen una cobertura de rastrojo significativamente mayor que los demás manejos. La cobertura en todos los manejos baja ligeramente con el tiempo debido a la desintegración del rastrojo. Las ventajas de una cobertura de rastrojo se manifestaran en esos manejos más visibles. La menor diferencia de CaP-paja parcialmente retenida al manejo CaP-paja retenida y su mayor diferencia a los demás manejos permiten concluir, que los efectos positivos de retención de paja parcial ya pueden ser ventajosos en comparación a manejos sin ninguna retención de rastrojo.

#### 4.2.2 Elasticidad de suelo

A continuación en la Figura 13 se presentan los resultados del promedio ponderado del diámetro de agregados (MWD). En la medición del MWD resulto significativamente más

alto en CaP-paja quemada que en los otros manejos en el nivel de fertilización de 0 kg N ha<sup>-1</sup>. En los tres niveles de fertilización de 150 kg N h<sup>-1</sup> y de 300 kg N ha<sup>-1</sup> se observa una tendencia de un mayor MWD de agradados del manejo con CaP-paja quemada.



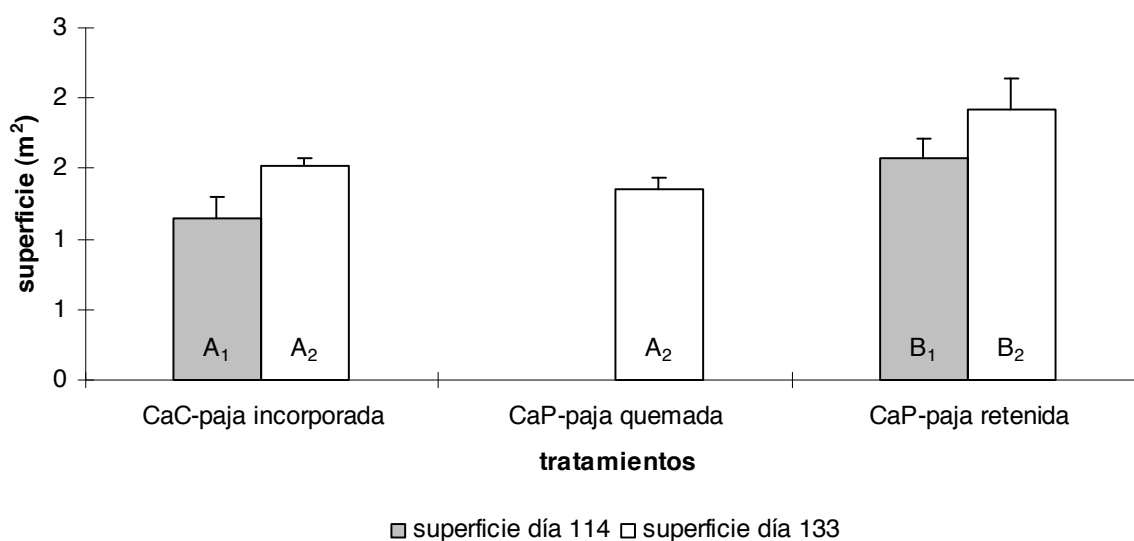
**Figura 13: Promedio ponderado del diámetro de los agregados, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes. Las barras indican desviación estándar; Valor medio con diferente letra diferente significativamente según la prueba t de student (LSD) a P < 0.05.**

El fenómeno de suelos autoabonados es de mayor interés para el manejo sostenible de la tierra, porque suelos autoabonados pueden producir a través de mojar- y secarse camas de siembra agregados naturales. Si el Veritsol no se autoabona, los fuertes enlaces entre las partículas lo hacen difícil que los agregados sean quebrados por el cultivo. También autoabonar acelera el proceso de recuperar su estructura de un suelo compactado (Coughlan et al., 1991). Una menor MWD y así una menor capacidad de este fenómeno en resulta negativo en los de CaP-paja quemada.

#### 4.2.3 Agrietamiento

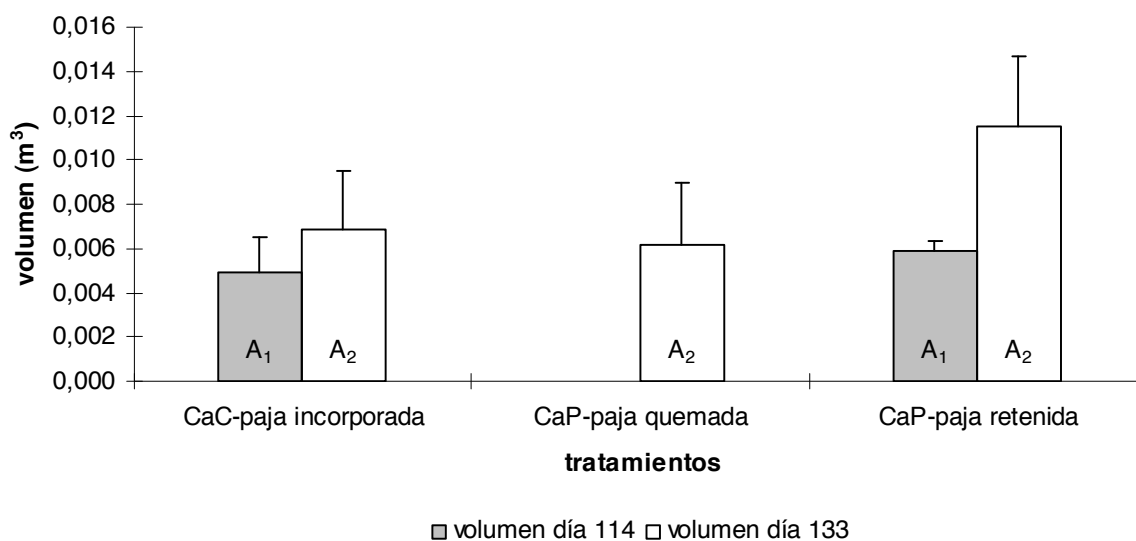
El agrietamiento en diferentes manejos se presenta en las Figura 14 y Figura 15. En la primera medición (114 días después de la siembra) se comparó CaP-paja retenida y CaC-paja incorporada. En el volumen de grietas no se encontró una diferencia significativa, pero en la comparación de la superficie de las grietas, CaP-paja retenida resultó con una superficie significativamente mayor.

En la segunda medición (133 días después de la siembra) se comparó CaP-paja retenida, CaP-paja quemada y CaC-paja incorporada. De nuevo, no se encontró una diferencia significativa en el volumen de grietas entre los manejos. En la comparación de de superficie de las grietas CaP-paja retenida resultó con una superficie significativamente mayor en comparación a CaP-paja quemada y CaC-paja incorporada.



**Figura 14 Superficie de grietas (dm<sup>2</sup>) en diferentes fechas después de la siembra**

**CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes; Superficie día 114 = superficie de grietas 114 días después de la siembra, Superficie día 133 = superficie de grietas 133 días después de la siembra. Las barras indican desviación estándar; Valor medio con diferente letra diferente significativamente según la prueba t de student (LSD) a P < 0.05**



**Figura 15 Volumen de grietas (m<sup>3</sup>) en diferentes fechas después de la siembra**

**CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes, volumen día 114 = volumen de grietas 114 días después de la siembra, volumen día 133 = volumen de grietas 133 días después de la siembra. Las barras indican desviación estándar; Valor medio con diferente letra diferente significativamente según la prueba t de student (LSD) a  $P < 0.05$ .**

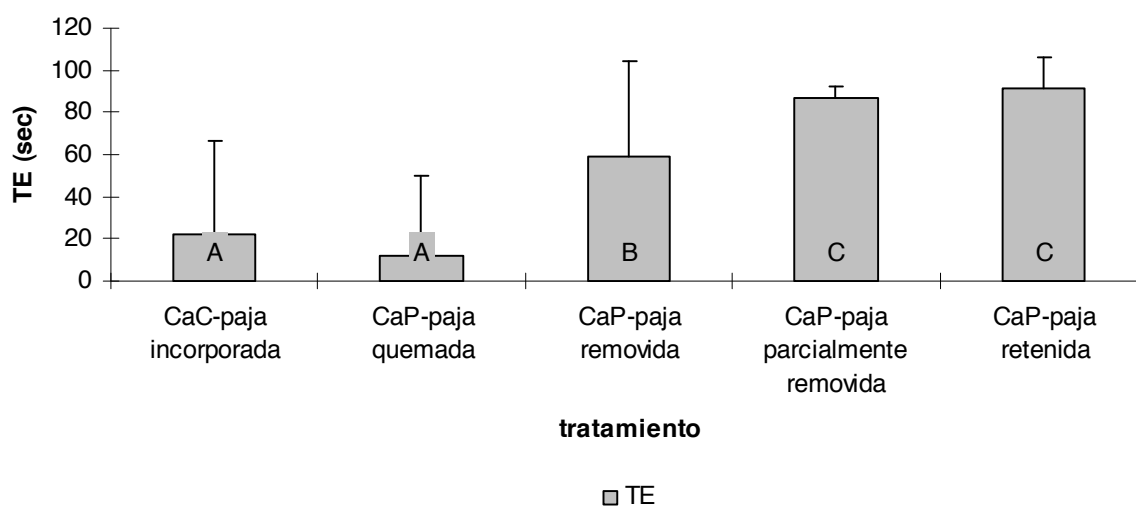
Como los suelos tipo Vertisoles son muy pesados con una conductividad saturada de agua baja (Novak et al., 2002), el agrietamiento del suelo da una oportunidad para rellenar el perfil con agua durante una lluvia o un riego (McGarity et al., 1984; Mitchell y van Genuchten, 1992). Por otro lado, extender el contacto entre el aire y el suelo puede aumentar de esta manera la pérdida de humedad por evaporación (Ritchie y Adams, 1974). Justo antes de la cosecha, el volumen como la superficie total de grietas por m<sup>2</sup> era lo más alto en PB-paja retenida. Las grietas en esta práctica dan la ventaja de aumentar la conductividad de agua, pero la pérdida de agua por evaporación por la superficie de las grietas está limitada ya que hay una cobertura de rastrojo.

#### 4.2.4 Tiempo de encharcamiento (TE)

En la Figura 16 se presenta los resultados para los diferentes manejos para el tiempo de encharcamiento (TE). El TE fue significativamente mayor en CaP-paja retenida y en comparación a CaC-paja incorporada, CaP-paja quemada y CaP-paja parcialmente



removida. CaC-paja incorporada y CaP-paja quemada que muestrearon el tiempo significativamente más cortó en comparación a los otros manejos.



**Figura 16: Tiempo de encharcamiento (TE) en segundos**

**CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes. Las barras indican desviación estándar; Valor medio con diferente letra diferente significativamente según la prueba t de student (LSD) a  $P < 0.05$ .**

El TE mide que tan rápido un suelo puede absorber una lluvia intensa. El impacto de las gotas de lluvia puede aumentar la compactación del suelo y puede sellar la superficie reduciendo la absorción de agua por el suelo (Box y Bruce, 1995) y aumentando el escurrimiento y la erosión (Singer et al., 1981; Zhang et al., 2007).

La infiltración directa era más alta en PB con retención (parcial o total) de paja que en CTB-paja incorporada y PB-paja quemada. La paja protege la superficie del suelo del impacto de la lluvia y evita de esta manera que se selle el suelo. La agricultura de conservación (PB con retención parcial o total de paja) mejora el aprovechamiento de la lluvia en comparación con la practica convencional (CTB-paja incorporada) o camas permanentes donde se quema la paja.

Estos resultados son similares a los de Zhang et al. (2007), que midió un tiempo de encharcamiento mayor y un escurrimiento menor en cero labranza con retención de paja en comparación con labranza convencional con quema de la paja. El manejo de

CaP-paja retenida se muestra ventajoso en esta medición. Hay menos escurrimiento de agua que aumenta la capacidad de infiltración y también previene erosión. El laboreo en camas convencionales y la aparentemente la quema de paja favorecen por su parte la erosión y impidan un mayor aprovechamiento del agua.

#### 4.2.5 Resistencia a la penetración del suelo

En la Figura 17 se presenta los resultados de la resistencia a la penetración del suelo. La resistencia a la penetración del suelo muestra poca diferencia entre los diferentes niveles de fertilización, por lo cual se tomaron los datos obtenidos en el nivel de fertilización de  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$  como ejemplo. Antes del primer riego de auxilio la resistencia en el nivel de 0 a 15 cm de profundidad CaP-paja retenida resulta significativamente mayor que en CaP-paja parcialmente removida, CaP-paja quemada y CaC-paja incorporada. CaC-paja incorporada que resultó con una resistencia significativamente menor a todos los otros manejos. En la profundidad de 15 a 30 cm CaP-paja quemada tiene la resistencia más alta, y es significativamente mayor a CaP-paja retenida. CaP-paja retenida tiene una resistencia significativamente menor a CaP-paja quemada, CaP-paja removida y CaP-paja parcialmente removida. En la profundidad de 30 a 45 cm y de 45 a 60 cm la resistencia de CaP-paja retenida es significativamente menor a todos lo demás manejos.

Después del primer riego de auxilio en la profundidad de 0 a 15 cm CaP-paja quemada resulta significativamente mayor a todos los demás manejos. CaC-paja incorporada tiene una resistencia significativamente menor a CaC-paja quemada, CaC-paja removida y CaC-paja parcialmente removida. En la profundidad de 15 a 30 cm CaP-paja quemada tiene la resistencia más alta, que es significativamente mayor a todos los manejos. La resistencia en CaP-paja retenida es significativamente menor a CaC-paja incorporada, CaP-paja quemada y CaP-paja removida. En la profundidad de 30 a 45 cm CaC-paja incorporada y CaP-paja quemada resultan con una resistencia significativamente mayor a los demás manejos. En la profundidad de 45 a 60 cm la resistencia de CaC-paja incorporada y CaP-paja quemada son significativamente mayores a CaP-paja retenida.

Antes del segundo riego de auxilio en la profundidad de 0 a 15 cm CaP-paja removida

resulta significativamente mayor que en CaP-paja quemada y CaC-paja incorporada, el último resultó con una resistencia significativamente menor a todos los demás manejos. En la profundidad de 15 a 30 cm, CaC-paja incorporada la resistencia resulta significativamente mayor a la de CaP-paja retenida, que es la que resultó con menor resistencia. En la profundidad de de 30 a 45 cm CaP-paja quemada la resistencia resulta significativamente mayor al la de CaP-paja retenida, que es el manejo con el menor valor. En la profundidad de 45 a 60 cm no hay diferencias significativas.

Después del segundo riego de auxilio en la profundidad de 0 a 15 cm CaP-paja quemada tiene una resistencia significativamente mayor a CaC-paja incorporada y CaP-paja retenida. CaC-paja incorporada tiene una resistencia significativamente menor a los demás manejos. En la profundidad de 15 a 30 cm CaP-paja quemada tiene una resistencia significativamente mayor a CaC-paja incorporada, CaP-paja parcialmente removida y CaP-paja retenida. En la profundidad de 30 a 45 cm y de 45 a 60 cm CaP-paja quemada resulta con una resistencia significativamente mayor que CaC-paja incorporada. La medición de la resistencia del suelo a la penetración puede identificar compactaciones en el suelo los cuales reducen el desarrollo de los raíces. Los datos obtenidos demuestran que la agricultura de conservación no favorece un endurecimiento si se retiene rastrojo en el campo en comparación al manejo de CaC-paja incorporada. Eso es similar a resultados de Unger y Jones (1998) y López et al. (1996) que compararon la resistencia a la penetración del suelo en manejos de labranza y de cero-labranza. Reportan menos resistencia en los primeros 10 cm en un manejo de labranza, pero no se encontraron tendencias en profundidades mayores. También Limon-Ortega et al. (2002) reporta resultados similares. Su conclusión también aplica en este caso: A un nivel de poca paja (como es el caso en los manejos de CaP-paja quemada y CaP-paja removida) la forma de remover (quemar o empacar) afecta a la resistencia del suelo. A niveles de mucha paja la forma de manejo de paja tiene menos impacto a la resistencia del suelo.

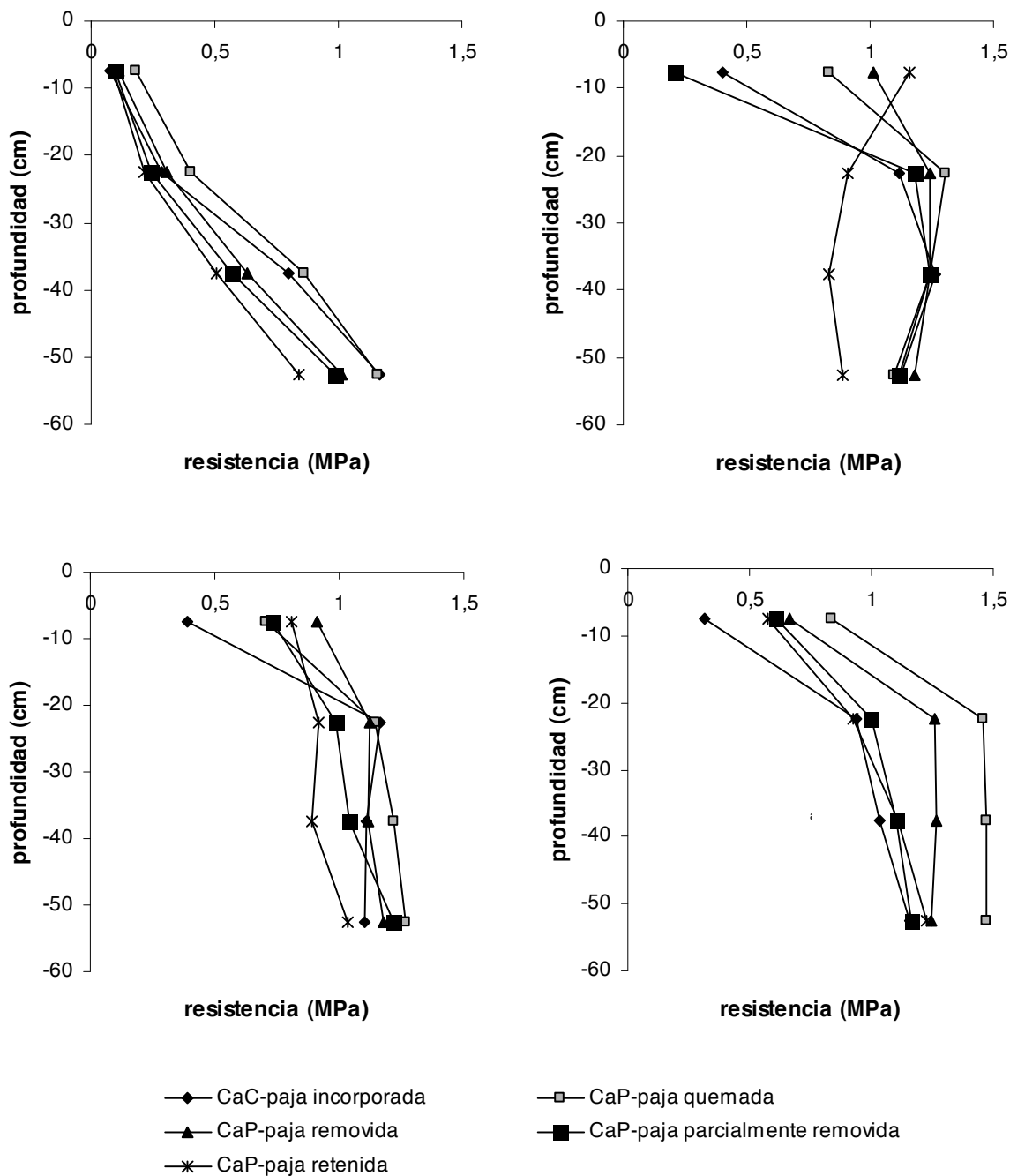


Figura 17: Comparación de la resistencia a la penetración del suelo entre los diferentes manejos para el nivel de fertilización de 150 N kg ha<sup>-1</sup> (13a) a los 42 días después de la siembra, (13b) a los 53 días después de la siembra, (13c) a los 67 días después de la siembra, (13d) a los 82 días después siembra. CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes.

#### 4.2.6 Contenido de humedad del suelo

En el Cuadro 1 se presenta los resultados del contenido de humedad gravimétrico del suelo hasta la profundidad de 60 cm. El contenido de humedad se midió gravimétricamente en cuatro profundidades de 0 a 15, de 15 a 30, de 30 a 45 y de 45 a 60 cm. El desarrollo entre los diferentes niveles de fertilización en las respectivas profundidades es similar. Entre las diferentes profundidades resulta una mayor variación de humedad en las capas superiores con más respuesta a eventos de riego o lluvia. En las profundidades mas profundas solo en excepciones se encuentran diferencias significativas. En la profundidad de 0 a 15 cm los manejos con retención parcial o completa de paja siempre (CaP-paja parcialmente removida y CaP-paja retenida) tiene el mayor contenido de humedad. Eso también aplica por la mayoría de las mediciones en la profundidad de 15 a 30 cm y con menos variación. En la profundidad de 30 a 45 cm y de 45 a 60 cm se lo observó menos variación de la humedad. Solamente al final del ciclo del cultivo disminuye en todos los manejos.

Como agua es un factor limitante en la agricultura, en especial en la región donde se hizo esta investigación, un manejo que permite un mejor abastamiento de agua al cultivo es necesario. Por lo tanto la investigación en prácticas agronómicas que mejoren el almacenamiento del agua en el suelo es importante. La agricultura de conservación puede ser una alternativa sustentable para el agricultor, lo que también concluye Jin et al. (2007).

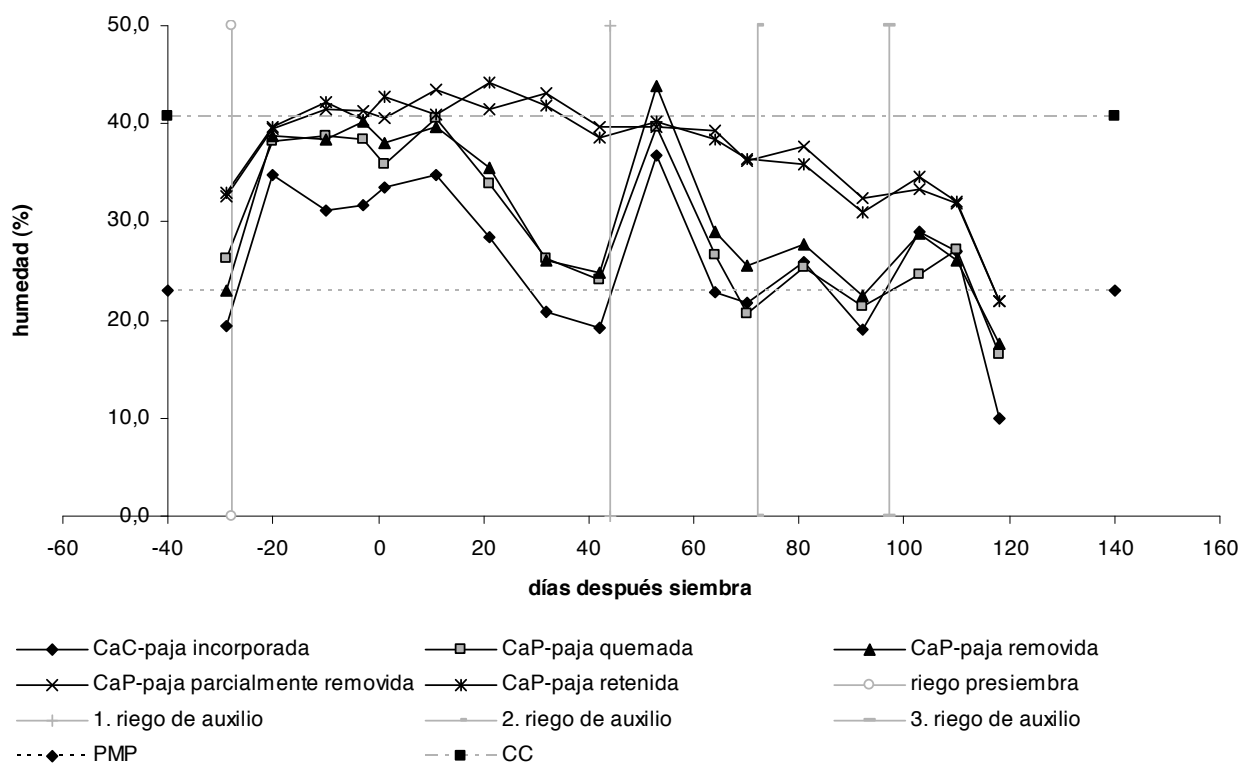
Cuadro 1: Contenido de humedad de suelo gravimétrico en diferentes profundidades

Manejo	Profundidad	días después siembra																
		-29	-20	-10	-3	1	11	21	32	42	53	64	70	81	92	103	110	118
CaC-INC	5 cm	19,3	34,7	31,2	31,7	33,5	34,8	28,4	20,9	19,1	36,8	22,8	21,7	25,9	19,0	29,0	26,9	10,0
CaP-QUE		26,3	38,3	38,8	38,4	35,8	40,6	33,9	26,2	24,0	39,7	26,6	20,7	25,4	21,4	24,6	27,1	16,4
CaP-REM		22,9	38,8	38,3	40,3	38,0	39,6	35,5	26,0	24,8	43,9	29,1	25,5	27,8	22,4	28,8	26,1	17,6
CaP-PAR		32,7	39,6	41,4	41,4	40,6	43,4	41,5	43,2	39,7	39,7	39,3	36,2	37,6	32,5	33,4	31,9	21,9
CaP-RET		32,9	39,7	42,3	40,4	42,7	41,0	44,2	41,9	38,7	40,2	38,3	36,4	35,9	30,9	34,6	32,1	22,0
CaC-INC	30 cm	35,7	39,8	41,6	41,1	42,6	41,7	42,8	41,7	38,2	40,0	39,3	36,8	36,8	33,2	34,0	30,6	14,3
CaP-QUE		34,9	40,1	41,6	40,8	42,2	43,7	43,0	41,4	40,1	42,1	39,3	37,4	36,3	32,4	33,5	29,9	18,4
CaP-REM		41,1	40,3	40,9	41,3	44,3	43,3	40,7	34,9	30,5	44,3	34,4	32,3	35,5	29,7	35,9	27,9	14,0
CaP-PAR		26,2	40,9	42,0	42,8	42,2	42,1	36,8	29,7	25,9	41,0	28,1	25,0	29,3	22,8	28,4	25,1	14,2
CaP-RET		34,0	41,0	43,0	42,5	43,1	43,7	44,3	42,5	37,2	40,7	37,9	33,6	34,5	30,0	33,3	28,3	20,8
CaC-INC	45 cm	20,0	41,1	41,3	42,0	39,6	43,0	37,1	26,5	25,9	43,8	28,8	25,5	28,6	22,5	28,9	26,7	19,1
CaP-QUE		37,4	42,0	43,0	43,5	44,5	45,0	42,7	42,0	35,7	44,2	38,8	35,5	35,0	31,4	33,3	27,8	13,8
CaP-REM		35,6	42,5	41,7	43,0	43,5	45,5	44,1	43,7	41,3	41,3	40,0	36,8	39,7	34,1	33,2	30,4	10,8
CaP-PAR		37,1	42,6	44,2	42,1	43,2	44,4	43,3	40,5	37,8	41,2	37,5	34,3	37,0	30,3	32,4	29,4	19,8
CaP-RET		36,4	43,1	43,0	42,1	44,4	45,9	44,5	41,2	37,1	43,2	38,5	35,3	35,1	31,5	33,1	28,1	22,1
CaC-INC	60 cm	36,9	43,3	44,4	45,4	46,5	46,0	44,1	43,4	40,0	44,2	38,8	35,1	36,7	31,9	32,5	28,9	20,6
CaP-QUE		36,8	43,4	42,9	43,3	44,4	45,1	44,1	37,0	33,2	43,2	36,3	31,2	32,3	28,2	30,9	26,3	27,5
CaP-REM		37,0	43,9	46,3	43,5	44,6	47,3	44,6	38,0	34,0	44,0	36,2	35,7	34,5	27,9	29,8	27,7	27,7
CaP-PAR		37,8	44,1	44,2	44,0	46,1	47,3	46,8	38,1	32,3	46,4	37,5	33,4	32,3	29,0	32,7	26,5	21,1
CaP-RET		38,7	44,9	45,2	45,9	46,7	47,7	46,0	42,3	36,1	46,2	37,5	32,7	35,0	30,5	32,2	28,8	20,1

CaC-INC = CaC-paja incorporada, CaP-QUE = CaP-paja quemada, CaP-REM = CaP-paja removida, CaP-PAR = CaP-paja parcialmente removida; CaP-RET= CaP-paja retenida, humedad en %

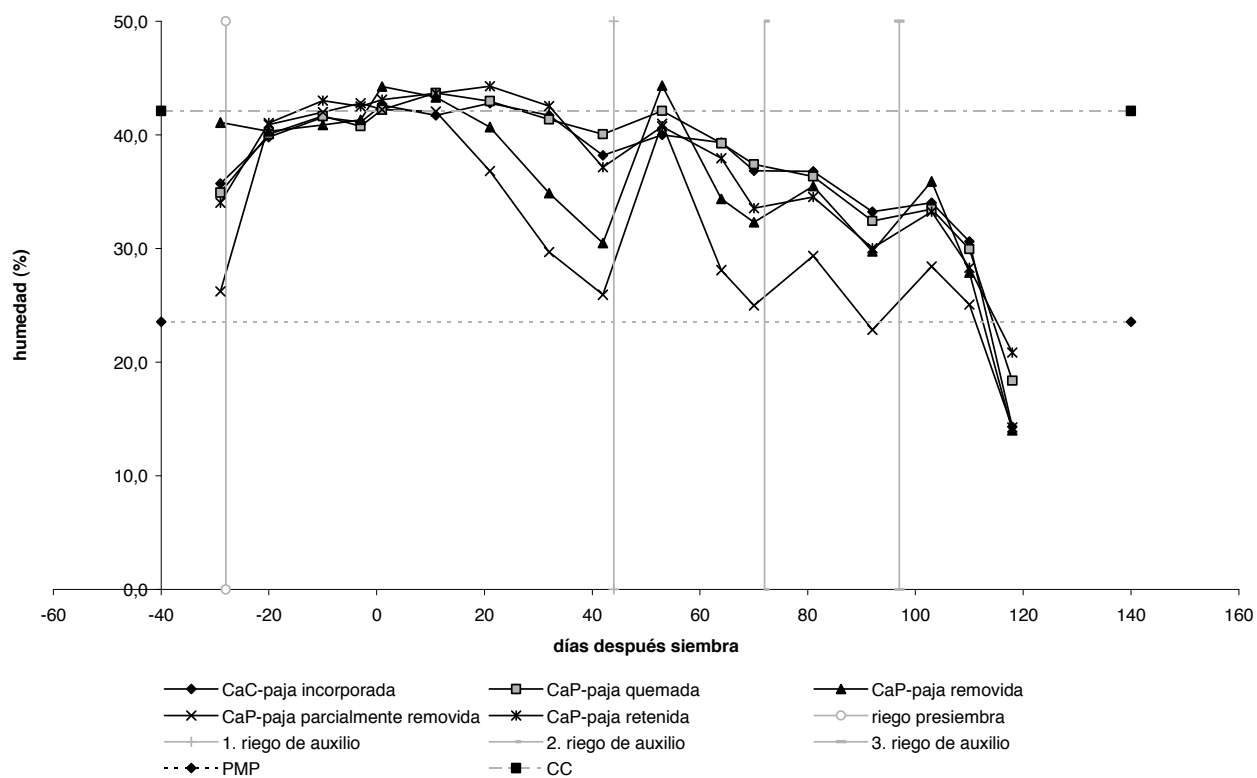
## Resultados

En las Figura 18 a Figura 20 se presenta la humedad en el suelo comparando diferentes manejos de labranza y residuos a lo largo del tiempo.



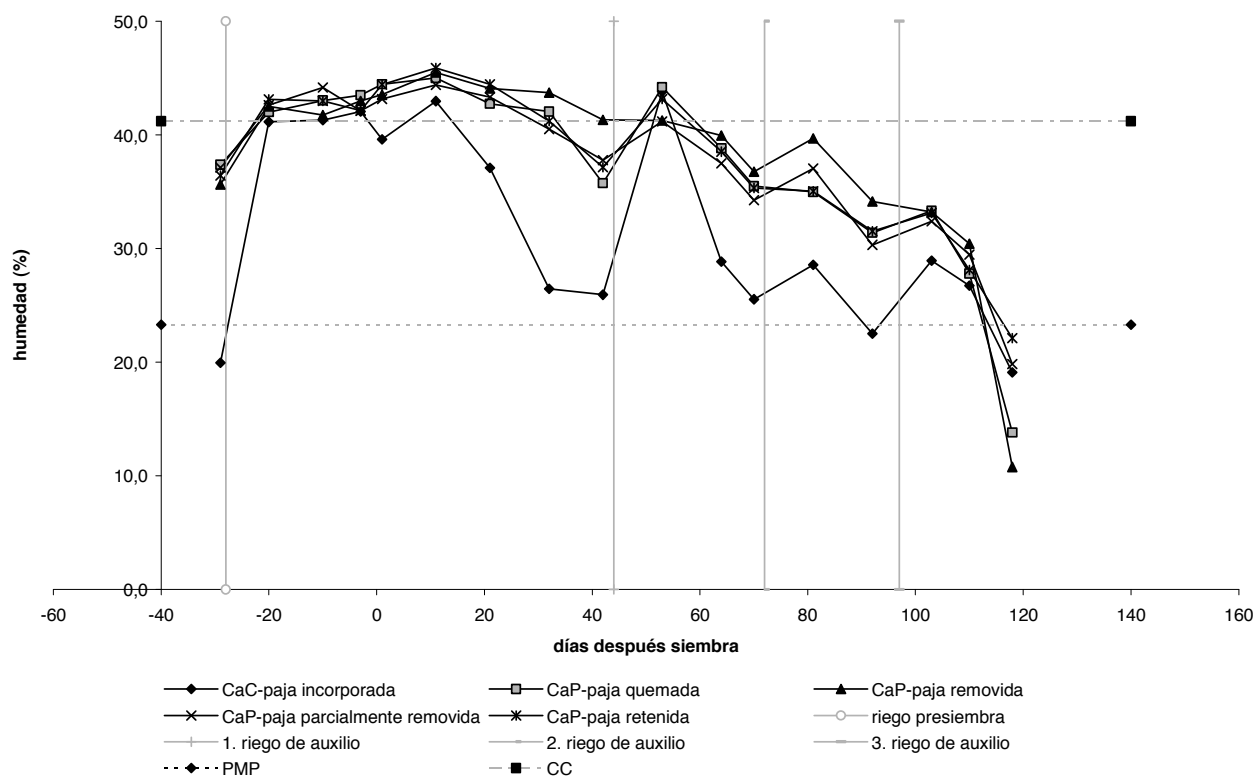
**Figura 18: Humedad gravimétrica (%), profundidad 0 a 15 cm, fertilización 150 N kg ha<sup>-1</sup>, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes, PMP = punto de marchites permanente**

## Resultados

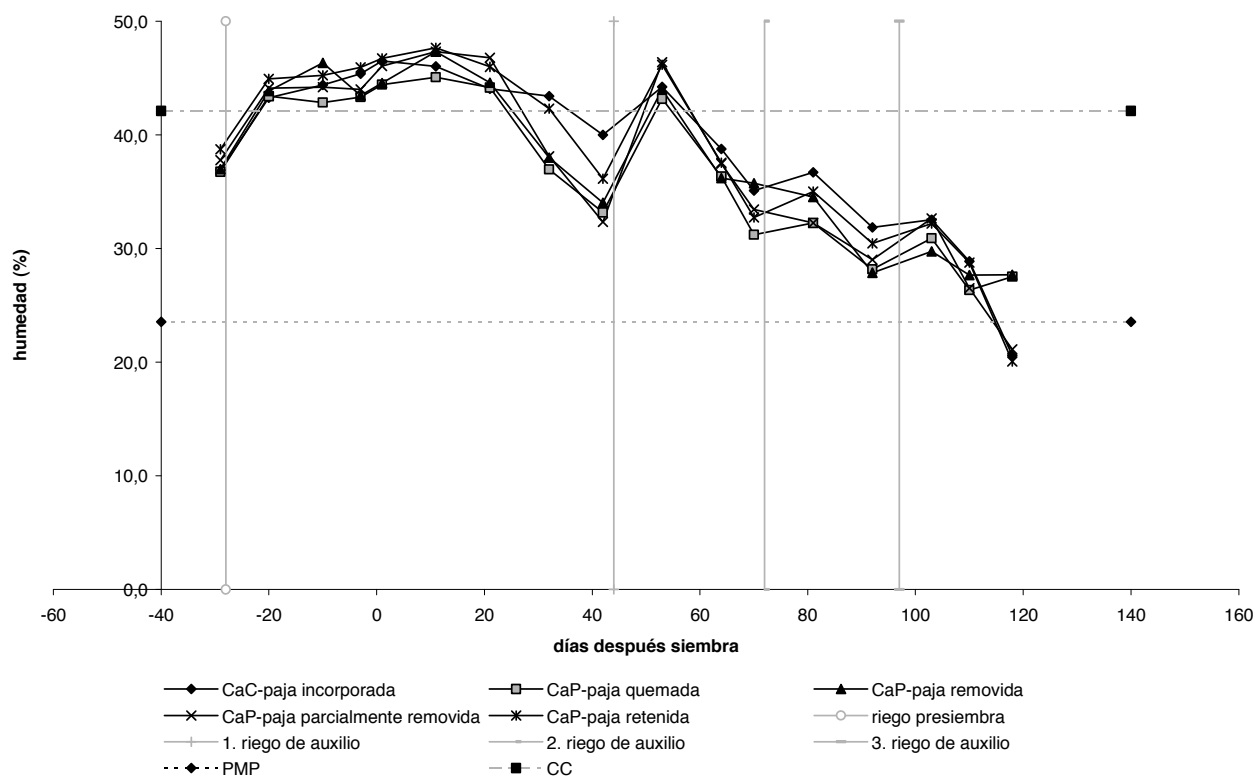


**Figura 19: Humedad gravimétrica (%), profundidad 15 a 30 cm, fertilización 150 N kg ha<sup>-1</sup>, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes, PMP = punto de marchites permanente**





**Figura 20: Humedad gravimétrica (%), profundidad 30 a 45 cm, fertilización 150 N kg ha<sup>-1</sup>, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes, PMP = punto de marchites permanente**



**Figura 21: Humedad gravimétrica (%), profundidad 45 a 60 cm, fertilización 150 N kg ha<sup>-1</sup>, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes, PMP = punto de marchites permanente**

En la comparación de las diferentes combinaciones de labranza y manejo de paja se encontró una tendencia de una mayor contenido de humedad con manejo de agricultura de conservación según la forma de retención de paja, esto es similar a lo que reporta Scopel et al. (2001). La importancia de la retención de paja también es confirmado por Bahrani et al. (2007). En los últimos años hay poca disponibilidad de agua en las presas del Valle del Yaqui y a los productores desde el año 2003 se les ha negado por falta de agua en la presa el último riego para el cultivo de trigo; es decir, anteriormente daban un riego de pre-siembra y cuatro riegos en planta (Flores, 2007). En nuestro caso en general se puede observar que el contenido de humedad durante los primeros días en todas las profundidades se mantuvo a un nivel de humedad alto inclusive mayor a la capacidad de campo (CC). Durante el primer riego de auxilio y el segundo se mantuvo dentro de la humedad aprovechable lo mismo que entre el

segundo y el tercer riego de auxilio y después del cuarto riego se observó una tendencia a disminuir al cruzar valores menores al punto de marchites permanente (PMP).

En la profundidad de 0 a 15 cm y 30 a 45 cm el manejo CaC-paja incorporada se mantuvo con menor contenido de humedad que el resto de los manejos. En tanto que en la profundidad de 15 a 30 cm el manejo CaP-paja parcialmente muestra la misma tendencia que el manejo CaC-paja incorporada. En la profundidad de 45 a 60 cm la tendencia de la cantidad de humedad en todos los sistemas de manejo fue muy similar.

### **4.3 Mediciones de riego**

#### **4.3.1 Flujo de agua**

En las Figura 22 a Figura 24 se presenta el flujo de agua en los manejos de CaC-paja incorporada, CaP-paja quemada y CaP-paja retenida.

La entrada de agua varía entre las parcelas grandes por lo tanto es importante medir la entrada en cada una de ellas donde se quiere evaluar el riego. En general, hubo una disminución de flujo en la entrada después de 5 horas de riego, por factores externos, bajando el caudal de agua. Después de seis horas de riego, la salida de agua es mayor que la entrada en el manejo con CaP-paja quemada, reflejando este tratamiento la menor permeabilidad en el suelo (Limon-Ortega et al., 2005) la cual impide la infiltración. Después de cortar la entrada de agua, se baja rápidamente la salida de agua en CaC-paja incorporada y CaP-paja quemada, lo que implica que el agua aplicada tiene menos oportunidad de infiltrarse.

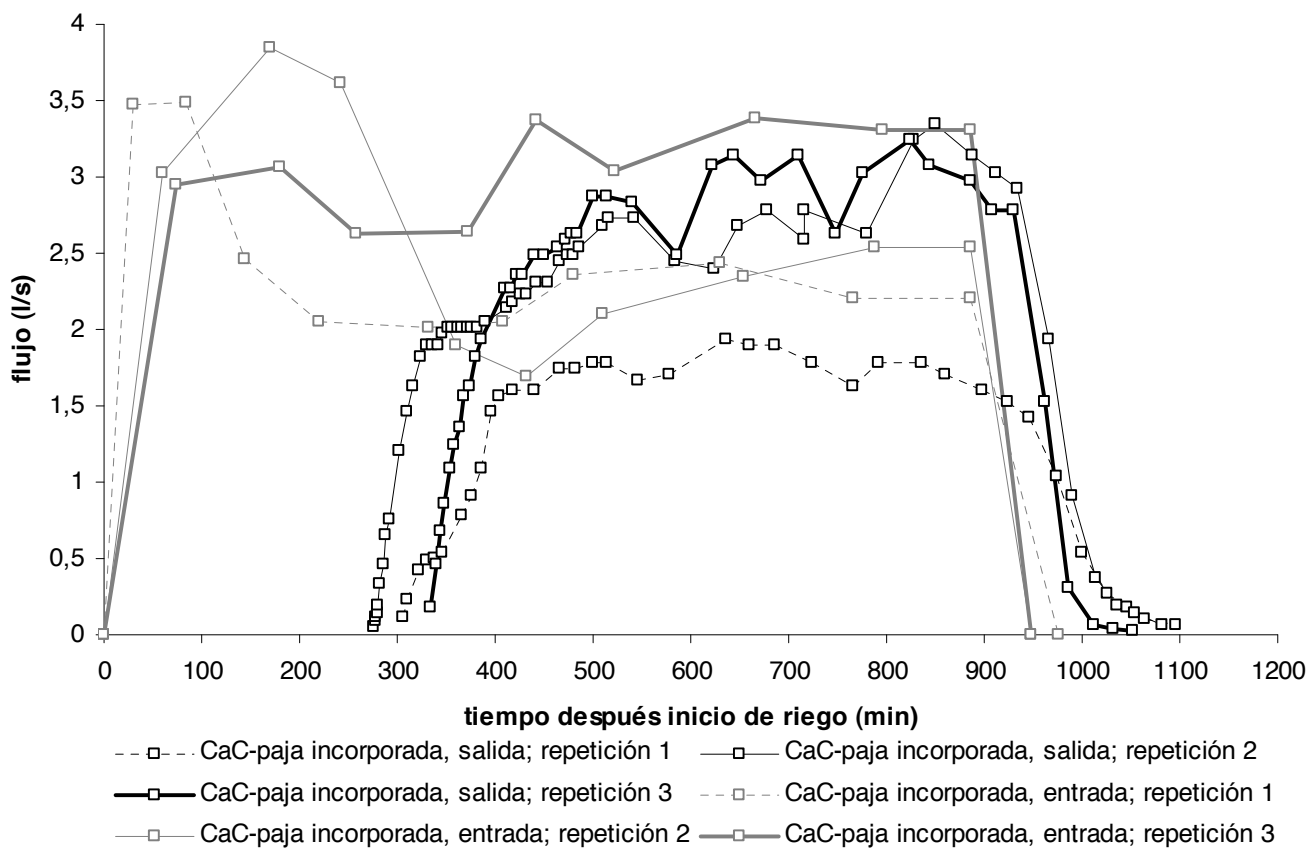


Figura 22: Flujo de agua en camas convencionales con incorporación de paja, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes.

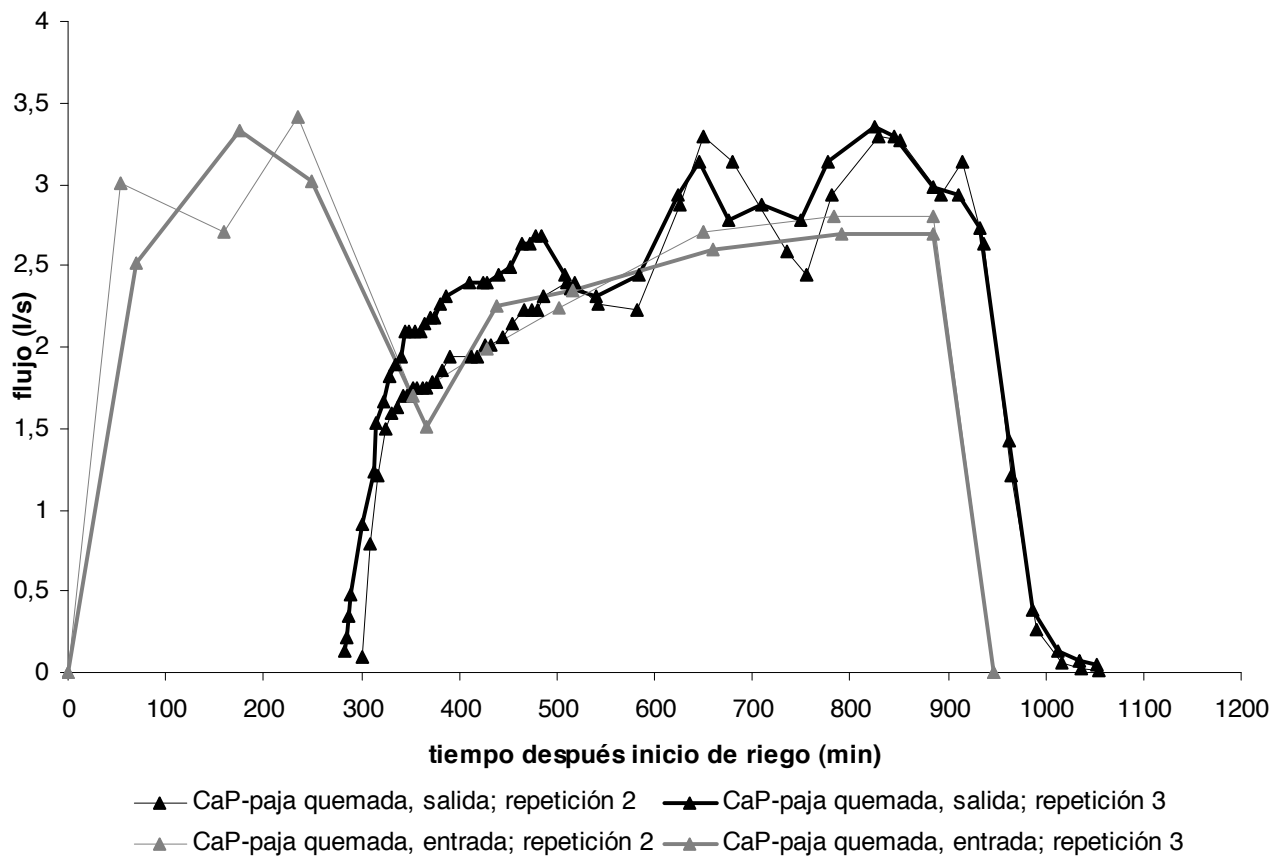
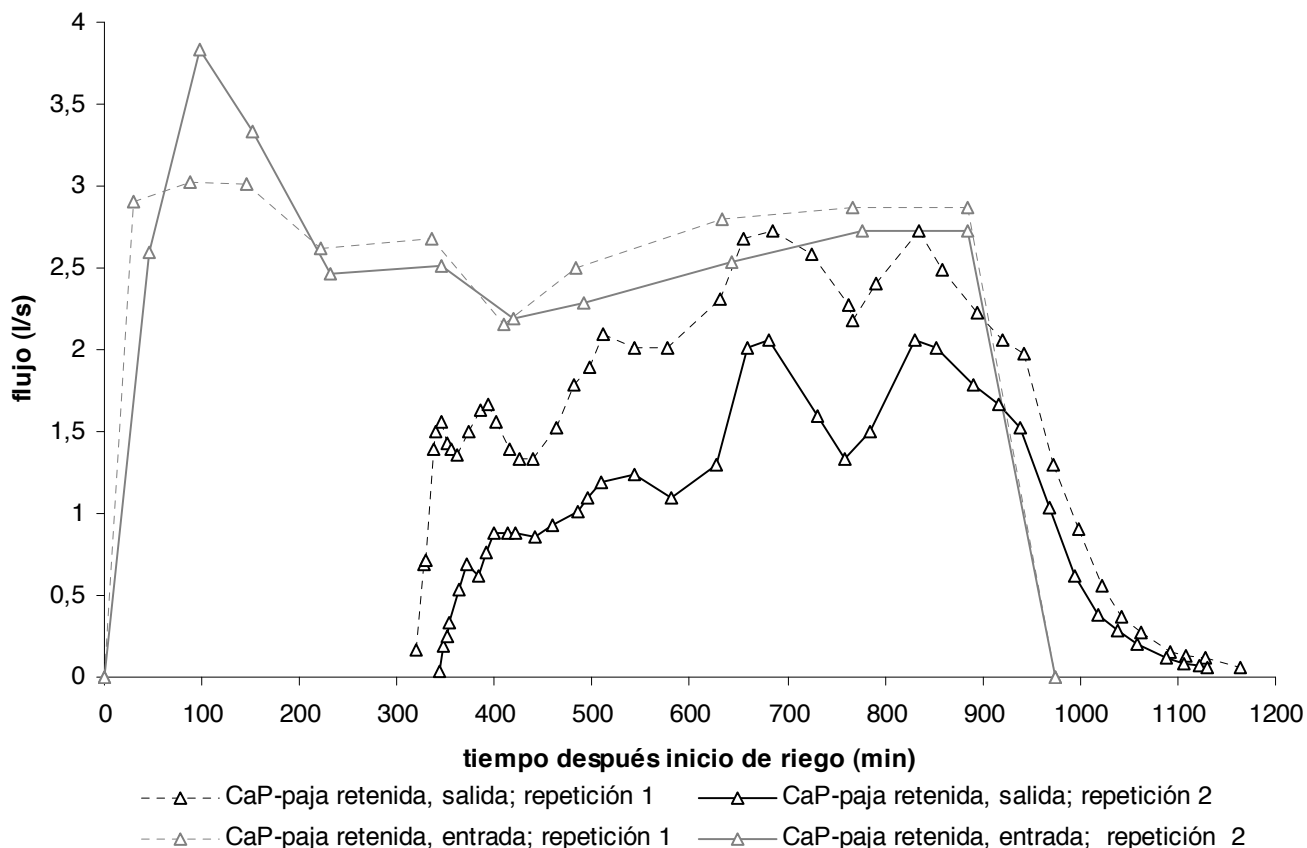


Figura 23: Flujo de agua en camas permanentes con quema de paja, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes.



**Figura 24: Flujo de agua en camas permanentes con retención de paja, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes.**

#### 4.3.2 Tasa de avance

En Figura 25 se presenta la tasa de avance de agua de riego en diferentes riegos y diferentes manejos. En el riego de pre-siembra no se presentó una diferencia significativamente entre los manejos al respecto a la tasa de avance.

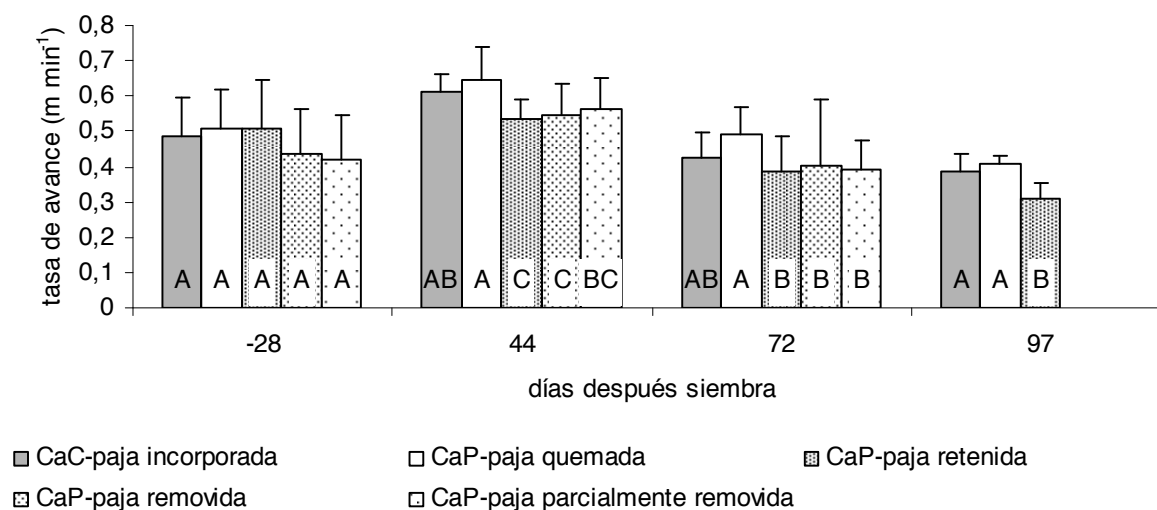
En el primer riego de auxilio CaC-paja incorporada tiene una tasa de avance de agua en el riego significativamente más alto que los manejos de camas permanentes sin quema de paja. CaP-paja retenida tienen una tasa de avance significativamente menor a todos los demás manejos.

En un manejo similar resultó la tasa de avance significativamente mayor en CaC-paja incorporada en comparación a CaP-paja retenida.

En el segundo riego de auxilio CaP-paja quemada tiene una tasa de avance

significativamente mayor a CaC-paja incorporada, CaP-paja parcialmente removida y CaP-paja retenida. CaP-paja removida tiene una tasa de avance significativamente mayor que CaP-paja parcialmente removida y CaP-paja retenida.

En el tercer riego de auxilio CaP-paja retenida mostró una tasa de avance significativamente menor que CaC-paja incorporada y CaP-paja quemada.



**Figura 25: Tasa de avance en m min<sup>-1</sup>, Las barras indican desviación estándar; Valor medio con diferente letra diferente significativamente según la prueba t de student (LSD) a P < 0.05**

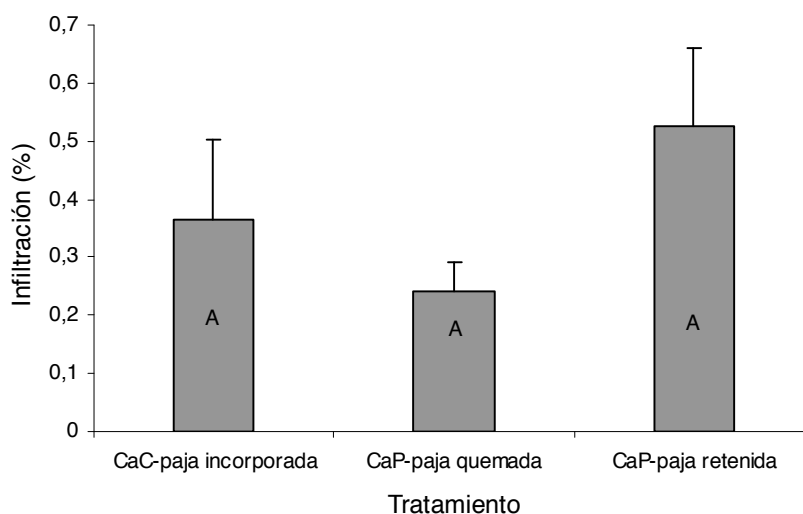
### 4.3.3 Infiltración

En el Cuadro 2 se presentan los resultados para la infiltración en camas convencionales con incorporación de paja, en camas permanentes con quema de paja y en camas permanentes con retención de toda la paja.

**Cuadro 2: Infiltración**

Manejo	Infiltración (%)
CaC-paja incorporada	0,36
CaP-paja quemada	0,24
CaC-paja retenida	0,52

En la Figura 26 se presenta el porcentaje del agua aplicado que se infiltró. El manejo CaP-paja retenida tiene el porcentaje más alto, aún nos se encontraron diferencias significativas.



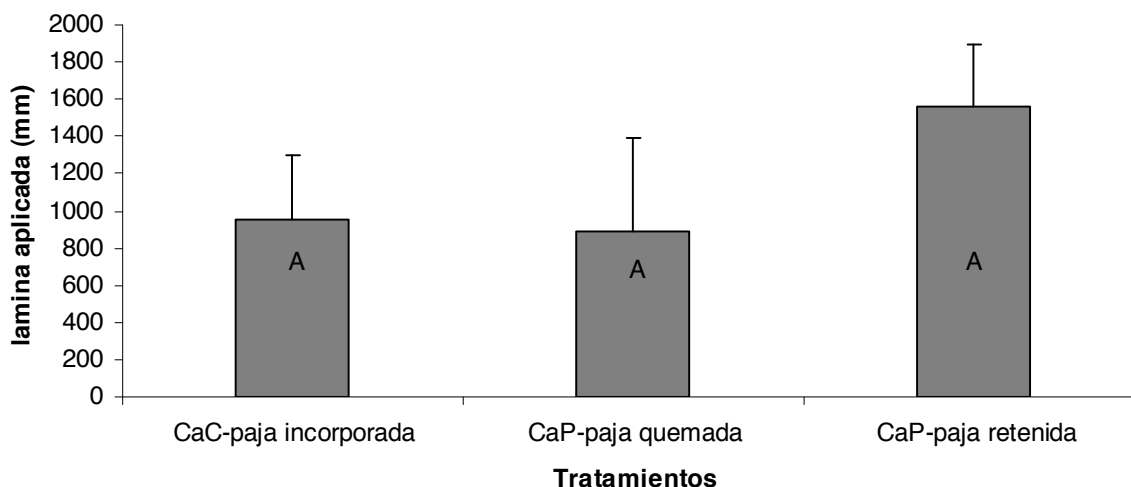
**Figura 26: Infiltración, como % del total del agua aplicado, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes, Las barras indican desviación estándar; Valor medio con diferente letra diferente significativamente según la prueba t de student (LSD) a  $P < 0.05$ .**

La infiltración refleja la capacidad del suelo de absorber el agua del riego. El manejo de CaP-paja tiene una mayor infiltración, que es un resultado de los factores anteriormente mencionados del cultivo y del suelo, que tiene este manejo. En contrario, el manejo de CaP-paja quemada tiene la menor infiltración, que a su vez es resultado de factores del cultivo y del suelo, pero que en este manejo se han desarrollado desventajosamente. Estos resultados son similares a los que reportan Truman y Rowland (2005), quienes encontraron una mayor infiltración también en la comparación de diferentes manejos de labranza en diferentes suelos.

### 1.1.1 Lámina de riego

La Figura 27 presenta la lámina de riego aplicada en CaC-paja incorporada, CaP-paja quemada y CaP-paja retenida. El manejo CaP-paja retenida presenta la lámina más grande, pero no se encontraron diferencias significativas.





**Figura 27: Lamina de riego aplicada, CaC = Camas convencionales, CaP = Camas permanentes, Las barras indican desviación estándar; Valor medio con diferente letra diferente significativamente según la prueba t de student (LSD) a  $P < 0.05$ .**

La lamina de riego aplicada refleja el agua de riego infiltrada desde la superficie. Una mayor lámina de riego aplicada incrementa la eficiencia en el uso de agua de un manejo. El manejo de CaP-paja retenida tiene la lámina de riego aplicada mayor, que es un resultado de los factores anteriormente mencionados del cultivo y del suelo, igual como que para la infiltración. Lo mismo se presenta el manejo de CaP-paja quemada. Este comportamiento es el reflejo de variaciones de contenido de humedad del suelo en cada uno de los tipos de manejo.

## Conclusiones

En los sistemas de manejo de camas permanentes con retención de paja el desarrollo inicial del cultivo es más tardado en comparación a camas convencionales, pero a través del tiempo en acumulación de biomasa mayor debido a que se mantienen más tiempo en la actividad fotosintética. En un sistema sin fertilización de nitrógeno, el cultivo crece lo peor en las camas permanentes con quema de residuos, ilustrando la falta de eficiencia en el uso de nutrientes en esta práctica.

Los sistemas con retención de paja (total o parcial) tienen una mayor infiltración directa (tiempo de encharcamiento) mayor que los otros sistemas. La resistencia a la penetración del suelo fue lo más alto en CAP con quema de paja. La labranza disminuye la resistencia en la capa superficial en comparación con las CaP, mientras que las CaP con retención de paja tuvieron la distribución de la resistencia más uniforme en el perfil. La elasticidad del suelo fue la más baja en CaP con quema de paja. La superficie de grietas fue más alta en CaP con retención de paja que en CaP con quema de paja y CaC. La medición de la entrada del agua y de la tasa de avance del agua así como la medición de salida del agua con una adaptación de un vertedor de cresta triangular resultó adecuada para la evaluación del riego a nivel de parcela experimental. La infiltración del agua del riego fue mayor en CaP con retención de paja que en CaP con quema de paja y CaC. El manejo de quemar los residuos es una práctica no recomendable por el efecto disminuir la calidad del suelo.

Los sistemas de manejo agrícolas con quema de paja con aportan a una mayor disponibilidad de agua la cultivo, mientras retención de paja total o parcialmente, contribuyen para tener una mayor eficiencia en el uso de agua

## 5 Literatura citada

- (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2006. Principales Suelos en México. <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/fisigeo/principa.cfm> [Accedido Noviembre 1, 2008].
- Abrol, I.P., Gupta, R.K. & Malik, R.K., 2005. *Conservation Agriculture –Status and Prospects*, Centre for Advancement of Sustainable Agriculture, New Delhi. <http://infobridge.org/asp/documents/1775.pdf#page=9> [Accedido Julio 13, 2008].
- Aquino, P., 1998. *The adoption of bed planting of wheat in the Yaqui Valley, Sonora, Mexico*, Mexico, D.F.: CIMMYT.
- Bahrani, M.J., Raufat, M.H. & Ghadiri, H., 2007. Influence of wheat residue management on irrigated corn grain production in a reduced tillage system. *Soil and Tillage Research*, 94, 305-309.
- Bandyopadhyay, K.K. et al., 2003. Influence of tillage practices and nutrient management on crack parameters in a Vertisol of central India. *Soil and Tillage Research*, 71(2), 133-142.
- Bessembinder, J. et al., 2005. Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. *Agricultural Water Management*, 73(2), 113-130.
- Blank, R.R. et al., Nutrient Availability in Rangeland Soils: Influence of Prescribed Burning, Herbaceous Vegetation Removal, Overseeding with *Bromus Tectorum*, Season, and Elevation. *Rangeland Ecology & Management*, 60(6), 644-655.
- Bos, M.G., 1976. *Discharge measurement structures* International Institute for Land Reclamation and Improvement., Wageningen, The Netherlands. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1976STIN...7831395B> [Accedido Julio 9, 2008].
- Box, J.E. & Russell Bruce, R., 1995. The Effect of Surface Cover on Infiltration and Soil Erosion. En *Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation*. New York, USA: CRC Press, págs. 107-123.
- Bronswijk, J.J.B., 1991. Relation between vertical soil movements and water-content changes in cracking clays. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 1120 - 1226.
- Brown, M.J., 1985. Effect of Grain Straw and Furrow Irrigation Stream Size on Soil Erosion and Infiltration.

- <http://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/440/> [Accedido Julio 9, 2008].
- Camacho Casas, M., Figueroa López, P. & Huerta Espino, J., 2002. Júpare C2001, nueva variedad de trigo duro para su cultivo en el noroeste de México.
- Center for Development Research Bonn, 2006. Economic and Ecological Restructuring of Land- and Water Use in the Region Khorezm (Uzbekistan) - A Pilot Project in Development Research.  
<http://www.dad.uz/userfiles/library/ZEF-UZ-Proposal-Phase2.pdf> [Accedido Noviembre 1, 2008].
- Chocobar, A., 2008. Macro- y mesofauna como indicador de calidad en suelos cumúlic phasem en un sistema de larga duración.
- CIMMYT, 2006. *Maize and Wheat Science for Farmers, Food, and Livelihoods: CIMMYT Annual Report 2005-2006*, Mexico, D.F.: CIMMYT.  
[http://www.cimmyt.org/english/docs/ann\\_report/2006/annualreport2006.pdf](http://www.cimmyt.org/english/docs/ann_report/2006/annualreport2006.pdf).
- CNA, 2000. CNA, Servicio Meteorológico Nacional. Available at: <http://smn.cna.gob.mx/> [Accedido Abril 14, 2008].
- Comisión Nacional del Agua, 2008. *Estadísticas del Agua en México Edición 2008* 1ª ed., México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1978. *Medição de vazão em cursos de água por meio de vertedores de paredes delgadas: procedimento.*, Sao Paulo.
- Coughlan, K. et al., 1991. The measurement of soil structure - Some practical initiatives. *Aust. J. Soil Res.*, 29(6), 869-889.
- Dalal, R.C., 1989. Long-Term Effects of No-Tillage, Crop Residue, and Nitrogen Application on Properties of a Vertisol. *Soil Science Society of America Journal*, 53, 1511 - 1515.
- Dasog, G.S. et al., 1988. Shrink-swell potential and cracking in clay soils of Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 68, 251-260.
- Dasog, G.S. & Shashidhara, G.B., 1993. Dimension and volume of cracks in a vertisol under different crop covers. *Soil Science*, 155, 424 - 428.
- Day, P.R., 1965. Particle Fractionation and Particle-Size Analysis. En *In Black, C. A., Evans, D. D., White, J. L., Ensminger, L. E., Clark, F.E. (Ed.) Methods of soil analysis: Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and Sampling*. Madison, USA: American Society of Agronomy, págs. 545 - 567.

- Dexter, A., 1991. Amelioration of soil by natural processes. *Soil and Tillage Research*, 20, 87 - 100.
- Dexter, A., 1986. Model experiments on the behaviour of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil. II. Entry of pea and wheat roots into sub-soil cracks. *Plant and Soil*, 95, 135 - 147.
- Ekboir, J.(., 2002. *CIMMYT 2000-2001 World Wheat Overview and Outlook: Developing No-Till Packages for Small-Scale Farmers*, Mexico, DF: CIMMYT.
- Evans, J.R., 1989. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. *Oecologia*, 78(1), 9-19.
- FAO, 2008. AQUASTAT - FAO's Information System on Water and Agriculture. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/dbase/index.stm> [Accedido Noviembre 12, 2008].
- FAO, 2000. AQUASTAT - Sistema de Informacion sobre el Uso del Agua en la Agricultura de la FAO. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries/mexico/indexesp.stm> [Accedido Noviembre 14, 2008].
- FAO, 2008. What is Conservation Agriculture? <http://www.fao.org/ag/ca/1a.html> [Accedido Abril 25, 2008].
- Flores, D., 2007. *Sistemas de producción en el Valle del Yaqui, México*, Mexico: CIMMYT.
- Flowers, M. & Lal, R., 1999. Axle load and tillage effects on the shrinkage characteristics of a Mollic Ochraqualf in northwest Ohio. *Soil and Tillage Research*, 50, 251 - 258.
- Follett, R.F., Gupta, S.C. & Hunt, P.G., 1987. Conservation practices: relation to the management of plant nutrients for crop production. En *Soil Fertility and Organic Matter as Critical Components of Production Systems*. SSSA Special Publication. Soil Science Society of America, págs. 19 - 52.
- Fox, W.E., 1964. Cracking characteristics and field capacity in a swelling soil. *Soil Science*, 98, 413.
- Gee, G.W. & Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis. En *Klute, A. (ed.) Methods of soils analysis*. Madison, WI.: ASA and SSSA, págs. 383- 411.
- Govaerts, B. et al., 2007. Infiltration, soil moisture, root rot and nematode populations after 12 years of different tillage, residue and crop rotation managements

- . *Soil and Tillage Research*, 94(1), 209 - 219.
- Govaerts, B. & Sayre, K., 2008. The Yaqui Valley of Sonora Mexico, where the beds came from?
- Govaerts, B. et al., 2006a. Conventionally Tilled and Permanent Raised Beds with Different Crop Residue Management: Effects on Soil C and N Dynamics. *Plant and Soil*, 280(1), 143-155.
- Govaerts, B., Sayre, K.D. & Deckers, J., 2006b. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research*, 87(2), 163-174.
- Govaerts, B. et al., 2007. Evaluating spatial within plot crop variability for different management practices with an optical sensor? *Plant and Soil*, 299(1), 29-42.
- Guerra, L.C., Bhuiyan, T.P. & Barker, R., 1998. *Producing more rice with less water*, Colombo, Sri Lanka: International Irrigation Management Institute.
- Gupta, S.C., Larson, W.E. & Linden, D.R., 1983. Tillage and Surface Residue Effects on Soil Upper Boundary Temperatures. *Soil Science Society of America Journal*, 47(6), 1212-1218.
- Hawkins, G.L., Sullivan, D. & Truman, C., 2007. Water Savings Through Conservation Tillage.  
[http://www.ars.usda.gov/research/publications/publications.htm?seq\\_no\\_115=200956](http://www.ars.usda.gov/research/publications/publications.htm?seq_no_115=200956).
- Herrera-Foessel, S.A. et al., 2005. New Genes for Leaf Rust Resistance in CIMMYT Durum Wheats. *Plant Disease*, 89, 809 - 814.
- Herrick, J.E. & Jones, T.L., 2002. A dynamic cone penetrometer for measuring penetration resistance. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1320–1324.
- Holmes, J.W., 1955. Water sorption and swelling of clay blocks. *European Journal of Soil Science*, 6, 200 - 208.
- Hulugalle, N.R., Bruyn, A.L.D. & Entwistle, P., 1997. Residual effects of tillage and crop rotation on soil properties, soil invertebrate numbers and nutrient uptake in an irrigated Vertisol sown to cotton. *Applied Soil Ecology*, 7, 11 - 30.
- Israelsen, O.W. et al., 1944. *Water application efficiencies in irrigation.*, Utah State Agr. College.
- Jensen, M., 2007. Beyond irrigation efficiency. *Irrigation Science*, 25(3), 233-245.

- Jin, K. et al., 2007. Effects of different management practices on the soil–water balance and crop yield for improved dryland farming in the Chinese Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*, 96, 131-144.
- Jiwani, R. & Lucas, S., 2001. Methods of Flow Measurement for Water and Wastewater; New ordinances (for billing, control and supervision etc.) as well as construction of structures and relief structures, demand in peak time for quantity measurement of raw sewage. Available at: [http://www.nivus.de/ximages/18685\\_flow.pdf](http://www.nivus.de/ximages/18685_flow.pdf) [Accedido Julio 15, 2008].
- Kassam, A. & Smith, M., 2001. FAO Methodologies on Crop Water Use and Crop Water Productivity. En pág. 18. <http://www.fao.org/AG/AGL/aglw/cropwater/docs/method.pdf> [Accedido Julio 4, 2008].
- Keller, A., Keller, J. & Seckler, D., 1996. *Integrated Water Resource Systems: Theory and Policy Implications*, Colombo, Sri Lanka: International Irrigation Management Institute. [http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI\\_Research\\_Reports/PDF/pub003/REPORT03.PDF](http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/pub003/REPORT03.PDF) [Accedido Julio 7, 2008].
- Langdale, G. et al., 1994. Concepts of residue management infiltration, runoff, and erosion. En *In J.L. Hatfield and B.A. Stewart (Eds.) . Crops Residue Management*. Boca Raton, FL.: Lewis Publishers, págs. 109 - 124.
- Lauritz, C.W., 1948. Apparent specific volume and shrinkage characteristics of soil materials. *Soil Science*, 65, 155 - 179.
- Levine, J. S., 1991. *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*. Cambridge, MA
- Limon-Ortega, A. et al., 2005. Soil aggregate and microbial biomass in a permanent bed wheat–maize planting system after 12 years. *Field Crops Research*, 97, 302 - 309.
- Limon-Ortega, A. et al., 2002. Soil attributes in a furrow-irrigated bed planting system in northwest Mexico. *Soil and Tillage Research*, 63, 123-132.
- LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd., 2007. LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd., 2007. V-notch (triangular) weir calculator. <http://www.lmnoeng.com/Weirs/vweir.htm>.
- López, M.V., Arrúe, J.L. & Sánchez-Girón, V., 1996. A comparison between seasonal changes in soil water storage and penetration resistance under conventional and conservation tillage systems in Aragón. *Soil and Tillage Research*, 37, 251-271.

- McGarity, J.W., Houtt, E.H. & So, H.B., 1984. The properties and utilization of cracking clay soils. En *Reviews in Rural Science*. Armidale, New South Wales, Australia.: University of New England.
- Mitchell, A.R. & van Genuchten, M.T., 1992. Shrinkage of bare and cultivated soil. *Soil Science Society of America Journal*, (56), 1036 - 1042.
- Moret, D. & Arrué, J.L., 2007. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage. *Soil and Tillage Research*, (96), 103–113.
- Novak, V., Simunek, J. & Van Genuchten, M.T., 2002. Infiltration into a swelling, cracked clay soil. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 50(1), 3.
- Ortiz Enríquez, J.E., Cortés Jiménez, J.M. & Félix Valencia, P., 2003. Manejo de riegos para los principales cultivos del sur de Sonora.
- Probert, M.E. et al., 1987. *The properties and management of Vertisols* CAB International. Wallingford, UK.
- Ritchie, J.T. & Adams, J.E., 1974. Field Measurement of Evaporation from Soil Shrinkage Cracks. *Soil Sci Soc Am J*, 38(1), 131-134.
- Sayre, D. & Hobbs, P., 2004. The Raised-Bed System of Cultivation for Irrigated Production Conditions. En ed. *Rattan Lal, Peter R. Hobbs, Norman Uphoff, David O. Hansen, Sustainable Agriculture and the International Rice-wheat System*. CRC Press, págs. 337 - 356. Available at:
- Schachtschabel, P. et al., 1998. *Lehrbuch der Bodenkunde* 14<sup>o</sup> ed., Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.
- Scopel, E. et al., 2004. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. *Agronomie*, 24, 383-395.
- Scopel, E. et al., 2001. Effects of Conservation Tillage on Water Supply and Rainfed Maize Production in Semiarid Zones of West-Central Mexico. *NRG Papers*, (01-01). <http://www.cimmyt.org/Research/NRG/pdf/NRG01-01.pdf>.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2008. Estadística Básica. <http://www.siap.gob.mx/> [Accedido Noviembre 12, 2008].
- Sharma, P.K., Verma, T.S. & Bhagat, R.M., 1995. Soil structural improvements with the addition of Lantana camara biomass in rye-wheat cropping. *Soil Use and Management*, 11, 199-203.
- Simmons, S.R., Oelke, E.A. & Anderson, P.M., 1995. Growth and Development Guide



- for Spring Wheat.  
<http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/DC2547.html> [Accedido Julio 28, 2008].
- Sinclair, T.R., Tanner, C.B. & Bennett, J.M., 1984. Water-Use Efficiency in Crop Production. *BioScience*, 34(1), 36-40.
- Singer, M.J., Matsuda, Y. & Blackard, J., 1981. Effect of Mulch Rate on Soil Loss by Raindrop Splash. *Soil Sci Soc Am J*, 45(1), 107-110.
- Singh, G., 2007. Conservation Agriculture for Managing Soil and Water Resources. En págs. 1-8.
- Skjemstad, J.O., Janik, L.J. & Taylor, J.A., 1998. Non-living soil organic matter : what do we know about it ? *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38, 667 - 680.
- Tennakoon, B. & Hulugalle, N.R., 2006. Impact of crop rotation and minimum tillage on water use efficiency of irrigated cotton in a Vertisol. *Irrigation Science*, 25, 45–52.
- Tennakoon, B. & Milroy, S.P., 2003. Crop water use and water use efficiency on irrigated cotton farms in Australia. *Agricultural Water Management*, 3, 179-194.
- Tolk, J.A., Howell, T.A. & Evett, S.R., 1999. ScienceDirect - Soil and Tillage Research : Effect of mulch, irrigation, and soil type on water use and yield of maize. *Soil and Tillage Research*, 50, 137-147.
- Truman, C. & Rowland, D.L., 2005. Conservation Tillage to manage water and supplemental irrigation in Georgia. En Institute Ecology. The University of Georgia, Athens, GA., págs. 1 - 4.  
<http://www.uga.edu/water/publication/uploads/TrumanC-GWRCpaper%20March22.pdf> [Accedido Octubre 3, 2008].
- Unger, P.W. & Jones, O.R., 1998. Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. *Soil and Tillage Research*, 45, 39-57.
- US Department of Interior, 2001. The Water Measurement Manual. En Denver, CO: US Dept of Interior, Bureau of Reclamation, págs. 45 - 57.  
[http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics\\_lab/pubs/wmm/](http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/wmm/) [Accedido Julio 9, 2008].
- Van Noordwijk, M. et al., 1993. Synlocation of biological activity, roots, cracks and recent organic inputs in a sugar beet field. *Geoderma*, 56, 265 - 276.
- Viets, F.G., 1962. Fertilizers And The Efficient Use Of Water. *Advances in Agronomy*, 14, 223-264.

Literatura citada

- Walker, W.R., 1989. *Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems*, Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Walker, W.R. & Skogerboe, G.V., 1987. *Surface Irrigation - Theory and Practice*, Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc.
- White, R.E., 2005. *Principles and Practice of Soil Science: The Soil As a Natural Resource* 4<sup>o</sup> ed., Blackwell Publishing.
- Zhang, G.S. et al., 2007. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage. *Soil and Tillage Research*, 92, 122-128.

## Anexos

### Cuadro 1a: Abreviaciones

Agricultura de conservación	AC
Camas convencionales	CaC
Camas permanentes	CaP
Centro de Investigaciones Agrícola del Noroeste	CIANO
Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo	CIMMYT
Comisión Nacional del Agua	CNA
destilada	DI
Eficiencia de riego efectiva	EE
Irrigation efficiency	EI
Evapotranspiración	ET
Eficiencia en el uso de agua	EUA
Eficiencia en el uso de agua del cultivo	EUAC
Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura	FAO
geometric mean diameter	GMD
hectáreas	ha
Hexametafosfato de sodio	HMP
Eficiencia en el uso del agua de riego	IEUA
Instituto nacional de investigación forestales agrícolas y pecuarias	INIFAP
metros sobre el nivel del mar	msnm
mean weight diameter	MWD
Nitrógeno	N
Índice Diferencial Normalizado de Vegetación	NDVI
Productividad del agua	PA
Productividad del agua en el cultivo	PAC
Resistencia a la penetración	R

Tiempo de encharcamiento

TE

Uso de agua en el cultiv

UAC

**Cuadro 2a: Cobertura del suelo por follaje (%)**

manejo	nivel de fertilización: 0 kg N ha <sup>-1</sup>	días después siembra										
		12	15	28	33	35	54	57	60	68	81	107
CaC-pin		3.64	2.86	10.50	19.23	21.89	47.00	48.89	40.11	48.89	45.11	22.56
CaP-pqu		2.63	2.59	8.64	13.60	16.89	32.56	40.56	38.89	41.22	34.44	11.67
CaP-pare		2.92	2.89	7.57	18.00	20.99	45.89	43.33	45.67	44.33	42.33	15.00
CaP-papa		1.88	2.73	7.48	14.58	18.69	41.78	44.56	38.67	44.44	44.78	22.22
CaP-paret		1.19	1.50	3.42	10.66	16.70	39.33	34.78	37.44	49.44	50.89	22.78
CaC-pin	nivel de fertilización: 150 kg N ha <sup>-1</sup>	2.47	2.52	9.80	22.58	29.26	74.00	68.11	73.44	81.39	91.00	64.00
CaP-pqu		3.66	3.43	12.86	24.10	31.33	74.22	77.33	74.44	80.89	90.00	60.22
CaP-pare		2.77	2.68	8.66	18.29	23.04	69.67	69.89	73.44	79.33	87.67	60.22
CaP-papa		1.74	2.16	9.49	22.58	24.62	71.22	71.33	76.44	82.33	92.11	65.89
CaP-paret		1.68	1.49	4.39	14.22	16.32	68.67	71.78	76.22	82.44	92.33	61.33
CaC-pin	nivel de fertilización: 300 kg N ha <sup>-1</sup>	2.67	3.23	10.01	24.29	32.50	75.56	78.22	80.33	88.11	97.22	72.89
CaP-pqu		2.93	4.59	11.21	28.26	33.63	75.89	73.78	76.56	83.67	96.00	69.44
CaP-pare		2.13	2.08	9.82	22.04	25.37	73.22	74.11	74.22	86.33	93.33	71.11
CaP-papa		2.39	1.92	7.33	18.04	25.54	75.44	72.67	76.22	83.89	95.00	68.00
CaP-paret		1.36	1.59	4.20	10.04	16.91	69.33	75.00	77.22	85.33	92.89	65.11

CaC-pin = Cama convencional, paja incorporada  
 CaP-pare = Cama permanente, paja removida  
 CaP-paret = Cama permanente, paja retenida  
 CaP-pqu = Cama permanente, paja quemada  
 CaP-papa = Cama permanente, paja parcialmente removida

**Cuadro 3a: Cobertura del suelo por rastrojo (%)**

manejo	nivel de fertilización: 150 kg N ha <sup>-1</sup>	días después siembra				
		8	12	39	84	127
CaC-pin		2.43	2.43	1.37	3.56	2.11
CaP-pqu		8.91	8.91	9.98	10.11	5.00
CaP-pare		41.84	41.84	31.09	36.06	37.44
CaP-papa		72.47	72.47	48.58	55.56	65.56
CaP-paret		100.00	100.00	89.37	81.44	75.33

CaC-pin = Cama convencional, paja incorporada  
 CaP-pare = Cama permanente, paja removida  
 CaP-paret = Cama permanente, paja retenida  
 CaP-pqu = Cama permanente, paja quemada  
 CaP-papa = Cama permanente, paja parcialmente removida

**Cuadro 4a: Promedio ponderado del diámetro de los agregados (MWD, mm)**

manejo		MWD (mm)
CaC-pin	nivel de fertilización: 0 kg N ha-1	0.81
CaP-pqu		0.98
CaP-pare		0.82
CaP-papa		1.04
CaP-paret		0.89
CaC-pin	nivel de fertilización: 150 kg N ha-1	0.74
CaP-pqu		0.94
CaP-pare		0.65
CaP-papa		0.59
CaP-paret		0.64
CaC-pin	nivel de fertilización: 300 kg N ha-1	0.81
CaP-pqu		0.98
CaP-pare		0.82
CaP-papa		1.04
CaP-paret		0.89

CaC-pin	=	Cama convencional, paja incorporada
CaP-pare	=	Cama permanente, paja removida
CaP-paret	=	Cama permanente, paja retenida
CaP-pqu	=	Cama permanente, paja quemada
CaP-papa	=	Cama permanente, paja parcialmente removida

**Cuadro del Anexo 5a: Agrietamiento**

manejo		días después siembra			
		114		133	
		Volumen de grietas (m <sup>3</sup> )		Superficie de grietas (m <sup>2</sup> )	
CaC-pin		1.1531	1.5172	0.0050	0.0069
CaP-pqu	nivel de fertilización:	-	1.3601	-	0.0062
CaP-paret	150 kg N ha-1	1.5799	1.9181	0.0059	0.0116

CaC-pin	=	Cama convencional, paja incorporada
CaP-pare	=	Cama permanente, paja removida
CaP-paret	=	Cama permanente, paja retenida
CaP-pqu	=	Cama permanente, paja quemada
CaP-papa	=	Cama permanente, paja parcialmente removida

**Cuadro 6a: Tiempo de encharcamiento**

manejo		TE (s)
CaC-pin	nivel de fertilización: 0 kg N ha <sup>-1</sup>	20.36
CaP-pqu		15.08
CaP-pare		67.14
CaP-papa		81.71
CaP-paret		100.86
CaC-pin	nivel de fertilización: 150 kg N ha <sup>-1</sup>	25.31
CaP-pqu		10.99
CaP-pare		60.33
CaP-papa		79.25
CaP-paret		97.62
CaC-pin	nivel de fertilización: 300 kg N ha <sup>-1</sup>	21.43
CaP-pqu		8.86
CaP-pare		50.27
CaP-papa		99.14
CaP-paret		74,88

CaC-pin	=	Cama convencional, paja incorporada
CaP-pare	=	Cama permanente, paja removida
CaP-paret	=	Cama permanente, paja retenida
CaP-pqu	=	Cama permanente, paja quemada
CaP-papa	=	Cama permanente, paja parcialmente removida

**Cuadro 7a: Resistencia a la penetración del suelo (MPa)**

manejo		Días después siembra			
		42	53	67	82
CaC-pin	profundidad: 0 a 15 cm	0.40	0.07	0.39	0.32
CaP-pqu		0.83	0.18	0.71	0.83
CaP-pare		1.16	0.09	0.81	0.57
CaP-papa		0.87	0.10	0.73	0.61
CaP-paret		1.02	0.11	0.91	0.67
CaC-pin	profundidad: 15 a 30 cm	1.12	0.28	1.17	0.94
CaP-pqu		1.31	0.40	1.14	1.46
CaP-pare		0.91	0.22	0.92	0.92
CaP-papa		1.18	0.24	0.98	1.00
CaP-paret		1.24	0.31	1.12	1.26
CaC-pin	profundidad: 30 a 45 cm	1.27	0.80	1.11	1.03
CaP-pqu		1.24	0.86	1.22	1.47
CaP-pare		0.83	0.51	0.89	1.11
CaP-papa		1.24	0.57	1.04	1.10
CaP-paret		1.24	0.63	1.12	1.27
CaC-pin	profundidad: 450 a 60 cm	1.12	1.17	1.10	1.16
CaP-pqu		1,10	1,16	1,27	1,47
CaP-pare		0,89	0,84	1,03	1,22
CaP-papa		1,12	0,98	1,22	1,17
CaP-paret		1,18	1,02	1,17	1,25

CaC-pin	=	Cama convencional, paja incorporada
---------	---	-------------------------------------

- CaP-pare = Cama permanente, paja removida
- CaP-paret = Cama permanente, paja retenida
- CaP-pqu = Cama permanente, paja quemada
- CaP-papa = Cama permanente, paja parcialmente removida

**Cuadro del Anexo 8a: Densidad aparente (mg m<sup>-3</sup>)**

manejo	profundidad:	días después siembra												81 y en adelante
		-29	-20	-10	-3	1	11	21	32	42	53	64	70	
CaC-pin	0 a 15 cm	1.2	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.2
CaP-pqu		1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
CaP-pare		1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
CaP-papa		1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
CaP-paret		1.3	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
CaC-pin	15 a 30 cm	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
CaP-pqu		1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CaP-pare		1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4
CaP-papa		1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CaP-paret		1.4	1.3	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3
CaC-pin	30 a 45 cm	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CaP-pqu		1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CaP-pare		1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CaP-papa		1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CaP-paret		1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CaC-pin	45 a 60 cm	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CaP-pqu		1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CaP-pare		1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CaP-papa		1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CaP-paret		1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CaC-pin	=	Cama convencional, paja incorporada												
CaP-pare	=	Cama permanente, paja removida												
CaP-paret	=	Cama permanente, paja retenida												
CaP-pqu	=	Cama permanente, paja quemada												
CaP-papa	=	Cama permanente, paja parcialmente removida												

**Cuadro 9b: Contenido de humedad del suelo (%)**

manejo	días después siembra																					
	11	15	20	27	29	32	35	39	54	63	69	78	83	85	91	93	104	107	118	120	124	
CaC-pin	0.13	0.14	0.20	0.33	0.37	0.45	0.47	0.53	0.63	0.46	0.39	0.36	0.33	0.30	0.29	0.28	0.26	0.24	0.18	0.14	0.11	
CaP-pqu	0.11	0.13	0.18	0.26	0.29	0.34	0.35	0.39	0.51	0.36	0.31	0.27	0.26	0.25	0.24	0.21	0.22	0.21	0.14	0.11	0.10	
CaP-pare	0.14	0.15	0.20	0.29	0.33	0.40	0.42	0.46	0.60	0.50	0.46	0.42	0.41	0.38	0.36	0.32	0.32	0.31	0.21	0.16	0.13	
CaP-papa	0.15	0.16	0.20	0.28	0.32	0.38	0.40	0.45	0.58	0.52	0.49	0.47	0.44	0.42	0.40	0.38	0.35	0.33	0.21	0.17	0.13	
CaP-paret	0.15	0.16	0.19	0.24	0.28	0.34	0.37	0.43	0.54	0.48	0.46	0.42	0.40	0.40	0.37	0.33	0.31	0.30	0.23	0.19	0.15	
CaC-pin	0.12	0.14	0.18	0.33	0.41	0.53	0.59	0.68	0.85	0.82	0.82	0.80	0.77	0.74	0.70	0.67	0.62	0.59	0.34	0.25	0.14	
CaP-pqu	0.12	0.14	0.21	0.39	0.48	0.62	0.63	0.70	0.86	0.82	0.82	0.78	0.74	0.71	0.67	0.62	0.59	0.53	0.25	0.18	0.12	
CaP-pare	0.14	0.16	0.20	0.33	0.41	0.52	0.56	0.63	0.83	0.81	0.82	0.78	0.76	0.73	0.68	0.64	0.60	0.56	0.30	0.21	0.13	
CaP-papa	0.15	0.16	0.21	0.33	0.40	0.51	0.54	0.61	0.83	0.80	0.80	0.78	0.75	0.73	0.68	0.64	0.60	0.56	0.31	0.23	0.14	
CaP-paret	0.15	0.17	0.19	0.24	0.31	0.40	0.46	0.56	0.81	0.78	0.80	0.75	0.72	0.71	0.64	0.60	0.56	0.52	0.32	0.25	0.15	
CaC-pin	0.14	0.15	0.21	0.38	0.46	0.61	0.66	0.72	0.88	0.85	0.86	0.84	0.82	0.81	0.77	0.74	0.70	0.67	0.48	0.38	0.22	
CaP-pqu	0.12	0.14	0.21	0.41	0.51	0.64	0.66	0.71	0.87	0.84	0.84	0.81	0.78	0.76	0.72	0.66	0.65	0.60	0.34	0.25	0.15	
CaP-pare	0.14	0.15	0.20	0.32	0.41	0.52	0.57	0.64	0.85	0.83	0.84	0.82	0.80	0.79	0.74	0.70	0.67	0.64	0.43	0.35	0.20	
CaP-papa	0.15	0.16	0.20	0.31	0.39	0.50	0.53	0.62	0.84	0.83	0.84	0.82	0.81	0.80	0.75	0.72	0.67	0.65	0.42	0.33	0.19	
CaP-paret	0.15	0.17	0.19	0.24	0.30	0.38	0.45	0.55	0.83	0.83	0.85	0.82	0.80	0.79	0.75	0.71	0.66	0.63	0.45	0.38	0.24	
CaC-pin	=	Cama convencional, paja incorporada																				
CaP-pare	=	Cama permanente, paja removida																				
CaP-paret	=	Cama permanente, paja retenida																				
CaP-pqu	=	Cama permanente, paja quemada																				
CaP-papa	=	Cama permanente, paja parcialmente removida																				



**Cuadro 10a: Tasa de avance (m min<sup>-1</sup>)**

manejo	riego pre-siembra	1. riego de auxilio	2. riego de auxilio	3. riego de auxilio
CaC-pin	0.49	0.61	0.42	0.39
CaP-pqu	0.51	0.65	0.49	0.41
CaP-pare	0.50	0.53	0.39	0.31
CaP-papa	0.44	0.55	0.40	-
CaP-paret	0.42	0.56	0.39	-

CaC-pin	=	Cama convencional, paja incorporada
CaP-pare	=	Cama permanente, paja removida
CaP-paret	=	Cama permanente, paja retenida
CaP-pqu	=	Cama permanente, paja quemada
CaP-papa	=	Cama permanente, paja parcialmente removida

**Cuadro 11a: Infiltración (en % del agua aplicada) y lámina infiltrada**

manejo		Infiltración (%)	lámina (mm)
CaC-pin		0.50	1188.22
CaP-pqu	1. repetición	0.28	704.92
CaP-paret		0.43	1184.60
CaC-pin		0.23	573.89
CaP-pqu	2. repetición	-	1456.96
CaP-paret		0.62	1636.69
CaC-pin		0.37	1113.76
CaP-pqu	3. repetición	0.21	509.92
CaP-paret		-	1846.36

CaC-pin	=	Cama convencional, paja incorporada
CaP-pare	=	Cama permanente, paja removida
CaP-paret	=	Cama permanente, paja retenida
CaP-pqu	=	Cama permanente, paja quemada
CaP-papa	=	Cama permanente, paja parcialmente removida