



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN
CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

**ESTUDIO DEL CRECIMIENTO DEL MAIZ
BAJO CONDICIONES DE TEMPORAL
MEDIANTE LA CAPTACIÓN DE AGUA DE
LLUVIA**

SANDRA LUZ TORRES SUÁREZ

**T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO
2008**

ESTUDIO DEL CRECIMIENTO DEL MAÍZ BAJO CONDICIONES DE TEMPORAL MEDIANTE LA CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

Sandra Luz Torres Suárez, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2008

El trabajo de investigación fue conducido en el campo experimental del campus Montecillo del Colegio de Postgraduados. Cuyo objetivo principal fue observar si existe afectación en el contenido de agua presente en el suelo, debida a una conformación diferente de surcos y la colocación de contras a lo largo de los mismos. La variedad de semilla utilizada fue San Josecito, sembrada el día 2 de junio de 2006. El diseño experimental fue el de Bloques Completos con Tratamientos Aleatorizados, con 4 repeticiones, disponiéndose de una superficie total de 1500 m². Los tratamientos probados consistieron en: Arada parcial con contras a cada 3 m (Trat A), surco tipo Anaya (inclinado) con contras a cada 3 m (Trat B), Surco normal con contras a cada 3 m (Trat C) y, finalmente, surco normal sin contras (Trat D, testigo). Las variables de estudio fueron: Contenido de humedad en el suelo, rendimiento de grano, materia seca total y su partición, análisis de algunos parámetros fisiotécnicos (número de hojas, altura de plantas y diámetro del tallo) y porcentaje de luz interceptada principalmente. La precipitación total ocurrida durante el ciclo del cultivo fue de 442.8 mm. Se concluyó que respecto al contenido de humedad en el suelo, se presentaron diferencias significativas entre tratamientos solo en fechas posteriores a precipitaciones del orden de 10 mm ó superiores; En cuanto a rendimiento, el tratamiento B fue el que presentó los valores más altos con 5.76 ton ha⁻¹, seguido del tratamiento C, el D y finalmente el A con 5.58, 5.53 y 5.3 ton ha⁻¹ respectivamente (no existieron diferencias significativas entre tratamientos, Tukey, 0.05). La mayor cantidad de materia seca total correspondió al tratamiento C, posteriormente el tratamiento B, y el A, para llegar finalmente al tratamiento D (Testigo) con 334.83, 330.02, 328.56 y 296.29 g planta⁻¹ respectivamente. Las alturas finales promedio de las plantas en todos los tratamientos fueron superiores a los 2.0 m, el número de hojas estuvo entre 13 y 15 y, el diámetro del tallo de hasta 3.57 cm. Finalmente, el comportamiento del porcentaje de Luz interceptada fue similar al del contenido de humedad, el tratamiento C fue el que presentó en la mayoría de las fechas de registro los porcentajes mayores, seguido de los tratamientos B, A y D.

Palabras clave: Maíz, microcuencas, temporal, contenido de humedad.

CORN GROWTH STUDY UNDER RAINFED CONDITIONS BY RAIN WATER CAPTURE

Sandra Luz Torres Suárez, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2008

This research was conducted in the Experimental field of the Colegio de Postgraduados *campus* Montecillo, The main objective was to observe if exists affectation in the soil water content due to different furrow conformation systems with stopper border placed each 3 m along the furrows. San Josecito corn variety was sown on june two. Completely blocks design experiment with randomized treatments with four repetitions was installed in 1500 m² surface field. The treatments were: Partial plowed system, with border stoppers at each 3 m spaced (Treat A), Anaya type furrow (with a slope from the ridge to the bottom of the furrow) with border stoppers at each 3 m spaced (Treat B), normal furrow with border stoppers at each 3 m spaced (Treat C) and normal furrow without border stoppers as reference (Treat D). The variables studied were: soil water content, grain yield, partition of dry matter and total dry matter; also the next physiotechnical variables: Number of leaves, plant height, stem diameter, and % of intercepted light. The total precipitation occurred during the cycle of the crop was 442.8 mm. It is concluded with respect to the soil water content, differences among treatment were found only after more than 10 mm rain events. With respect to grain yield, were not found significant differences (Tukey, $\alpha = 0.05$); the more higher values were found with B treatment, 5.76 ton ha⁻¹, following C, D, and A treatments with yields 5.58, 5.53, 5.30 ton ha⁻¹ respectively. The greatest dry matter value corresponded to the C treatment following by the B, A, and D treatments with 334.83, 330.02, 328.56, and 296 g plant⁻¹ respectively. From the analysis of the physiotechnical variables; the average plant height in all treatments were higher than 2 m height, number of leaves were among 13 to 15 leaves per plant, and 3.57 cm stem diameter. Finally the trend of the % of light intercepted along the crop cycle was similar to the soil water content; the C treatment show the higher values of this variable in the more sampling dates following by the B, A, and D treatments.

Keywords: Corn, micro-basins, rainfed, water content.

DEDICATORIA

A mis padres Adán Torres Perea y Agustina Suárez López, por su enseñanza, comprensión y apoyo incondicional.

A mi esposo Sergio I. Mendoza Pedroza y mi hija Lorely Mendoza Torres, con amor y agradecimiento por su apoyo, comprensión y paciencia durante la realización de mis estudios, los adoro.

A mis hermanas Yazmín, Claudia, Vicky y Diana Laura, por el cariño que nos une, a pesar de las adversidades.

A mis sobrinos Mary Fer, Adan y David, con mucho cariño.

A mis amigos Dulce, Héctor, Heladio, Fabiola, Erick, Nahielly, Juan, Juan Carlos, Said, José, y a todos aquellos que de alguna forma hicieron posible la culminación de mis estudios de Maestría.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico, que hizo posible el desarrollo de mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados, en especial al Programa de Hidrociencias, por contribuir en mi formación como profesionista.

Al Dr. Leonardo Tijerina Chávez, por su invaluable asesoría, apoyo y dedicación a mi trabajo de tesis, pero sobre todo, por su enorme paciencia, muchas gracias.

Al Dr. Iouri Nikolskii Gavrilov, por su asesoría, revisión y aportaciones brindadas, todo ello en mejora del presente trabajo.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez, por su apoyo, comentarios acertados y disposición mostrada en todo momento.

Al Dr. Enrique Mejía Sáenz, por el apoyo y facilidades brindadas en la culminación de mis estudios de maestría.

A todos los maestros del Programa de Hidrociencias, quienes comparten día a día el conocimiento de su cátedra, con todos aquellos que tenemos la fortuna de cursar sus materias.

A laboratoristas, secretarías y trabajadores de campo que laboran en el Colegio de Postgraduados, por su disposición y cooperación.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	Error! Bookmark not defined.
2. REVISIÓN DE LITERATURA	Error! Bookmark not defined.
2.1. EL MAIZ	Error! Bookmark not defined.
2.1.1. Su origen y adaptación	Error! Bookmark not defined.
2.1.2. Requerimientos hídricos.....	Error! Bookmark not defined.
2.1.3. Producción e importancia del maíz en México	Error! Bookmark not defined.
2.2. CAPTACION DE AGUA DE LLUVIA.....	Error! Bookmark not defined.
2.2.1. Definiciones	Error! Bookmark not defined.
2.2.2. Antecedentes	Error! Bookmark not defined.
2.2.3. Ventajas y desventajas de la captación de agua de lluvia	Error! Bookmark not de
2.2.4. Factores que determinan la captación de agua de lluvia	Error! Bookmark not def
2.2.5. Tipos de captación de agua de lluvia .	Error! Bookmark not defined.
2.3. INVESTIGACIONES REALIZADAS EN CAPTACION DE AGUA DE LLUVIA.....	Error! Bookmark not defined.
2.4. CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN DE LITERATURA	Error! Bookmark not defined.
3. OBJETIVOS	Error! Bookmark not defined.
3.1. OBJETIVO GENERAL	Error! Bookmark not defined.
3.2. OBJETIVOS PARTICULARES.....	Error! Bookmark not defined.
4. HIPÓTESIS.....	Error! Bookmark not defined.
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	Error! Bookmark not defined.
5. 1. CARACTERÍSTICAS DEL SITIO EXPERIMENTAL	Error! Bookmark not defined.
5.1.1. Ubicación Geográfica.....	Error! Bookmark not defined.
5.1.2. Clima	Error! Bookmark not defined.
5.1.3. Suelos	Error! Bookmark not defined.
5.2. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	Error! Bookmark not defined.
5.3. ESTABLECIMIENTO Y CONDUCCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	Error! Bookmark not defined.
5.3.1. Preparación del terreno	Error! Bookmark not defined.
5.3.2. Establecimiento del experimento.....	Error! Bookmark not defined.
5.3.3. Siembra.....	Error! Bookmark not defined.
5.3.4. Aclareo.....	Error! Bookmark not defined.

5.3.5. Fertilización	Error! Bookmark not defined.
5.3.6. Control de malezas, plagas y enfermedades.	Error! Bookmark not defined.
5.4. REGISTRO DE LAS OBSERVACIONES REALIZADAS	Error! Bookmark not defined.
5.4.1 Precipitación pluvial	Error! Bookmark not defined.
5.4.2. Humedad del suelo	Error! Bookmark not defined.
5.4.3. Radiación Fotosintéticamente Activa	Error! Bookmark not defined.
5.4.4. Rendimiento de grano	Error! Bookmark not defined.
5.4.5. Materia seca total y su partición	Error! Bookmark not defined.
5.4.6. Altura, diámetro y número de hojas. ..	Error! Bookmark not defined.
5.5. OTRAS OBSERVACIONES	Error! Bookmark not defined.
5.5.1. Determinación del coeficiente de absorción foliar	Error! Bookmark not defined.
5.5.2. Explicación de los rendimientos obtenidos utilizando la metodología propuesta por la FAO (2000). ..	Error! Bookmark not defined.
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	Error! Bookmark not defined.
6.1. PRECIPITACIÓN PLUVIAL	Error! Bookmark not defined.
6.2. VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN	Error! Bookmark not defined.
6.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO	Error! Bookmark not defined.
6.4. ANÁLISIS DE LA HUMEDAD DEL SUELO ..	Error! Bookmark not defined.
6.4.1. Etapa de establecimiento del cultivo ..	Error! Bookmark not defined.
6.4.2. Etapa vegetativa	Error! Bookmark not defined.
6.4.3. Etapa de floración	Error! Bookmark not defined.
6.4.4. Etapa de formación del elote y llenado del grano	Error! Bookmark not defined.
6.4.5. Etapa de madurez	Error! Bookmark not defined.
6.5. PORCENTAJE DE LUZ INTERCEPTADA (% LI)	Error! Bookmark not defined.
6.6. RENDIMIENTO DE GRANO	Error! Bookmark not defined.
6.7. MATERIA SECA TOTAL Y SU PARTICIÓN	Error! Bookmark not defined.
6.8. ANÁLISIS DE ALGUNOS FACTORES FISIOTÉCNICOS	Error! Bookmark not defined.
6.8.1. Altura	Error! Bookmark not defined.
6.8.2. No. de Hojas	Error! Bookmark not defined.
6.8.3. Diámetro	Error! Bookmark not defined.
6.9. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN FOLIAR (K)	Error! Bookmark not defined.

6.10. Explicación de los rendimientos obtenidos utilizando la metodología propuesta por la FAO (2000).....	Error! Bookmark not defined.
7. CONCLUSIONES	Error! Bookmark not defined.
8. RECOMENDACIONES	Error! Bookmark not defined.
9. LITERATURA CITADA	Error! Bookmark not defined.
ANEXOS	Error! Bookmark not defined.

ÍNDICE DE CUADROS

- Cuadro 1. Valores de las propiedades físicas del suelo determinadas al sitio experimental, por profundidad por bloque. **Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 2. Valores medios del porcentaje de humedad a CC y PMP. **Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 3. Propiedades químicas de los suelos determinadas al sitio experimental. **Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 4. Precipitación y evaporación mensuales y temperatura media mensual ocurridas durante el ciclo del cultivo de maíz. Montecillo, Méx. 2006. **Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 5. Precipitación, su distribución en eventos y lámina (mm) por etapas fenológicas, durante el ciclo del maíz. Montecillo, Mex. 2006. **Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 6. Velocidad de Infiltración (I) e infiltración acumulada (Z) en el sitio experimental. Montecillo, México. 2006. **Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 7. Cálculo de la Evapotranspiración potencial del cultivo de maíz, por el método de Blaney y Criddle. Periodo: Junio-Noviembre de 2006. Montecillo, Méx. **Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 8. Porcentaje de Luz interceptada por el cultivo de maíz. Montecillo, Méx. 2006. **Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 9. Rendimiento de grano (Kg/parcela útil) obtenido para cada tratamiento. **Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 10. Resultados del ANVA realizado a los valores de Rendimiento de grano (presentados en el cuadro 9). **Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 11. Distribución de la materia seca por planta de maíz en los tratamientos de estudio. **Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 12. Datos de altura promedio (cm) de las plantas seleccionadas por tratamiento. **Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 13. Valores promedio del número de hojas del cultivo de maíz en los diferentes tratamientos. **Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 14. Valores promedio de diámetro del tallo (cm), correspondientes a cada tratamiento. **Error! Bookmark not defined.**

- Cuadro 15. Valores de los coeficientes de absorción Foliar determinados por tratamiento.....**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 16. Valores obtenidos para cada variable considerada de influencia en el rendimiento del cultivo (Y).**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro 17. Valores relativos de rendimiento para los diferentes bloques, así como su correspondiente $K_{hidr.}$ **Error! Bookmark not defined.**

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Participación de la producción del maíz en la producción de cereales.**Error! Bookmark not defined.**
- Figura 2. Principales técnicas de captación de Agua de lluvia.**Error! Bookmark not defined.**
- Figura 3. Localización del sitio experimental dentro del campus Montecillo del Colegio de Postgraduados. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 4. Disposición de los bloques en el sitio experimental.**Error! Bookmark not defined.**
- Figura 5. Tratamientos de los que constó el experimento.**Error! Bookmark not defined.**
- Figura 6. Distribución de los tratamientos en cada bloque del sitio experimental.**Error! Bookmark not defined.**
- Figura 7. Hoja de maíz afectada por roya común (*Puccinia sorghi*),**Error! Bookmark not defined.**
- Figura 8. Obtención de la ecuación que relaciona el valor registrado por el sensor de humedad modelo CR500 con el contenido de humedad gravimétrico. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 9. Ubicación de la “parcela útil” por tratamiento por bloque en el sitio experimental, utilizada en la obtención del rendimiento de grano.**Error! Bookmark not defined.**
- Figura 10. Plantas etiquetadas por bloque utilizadas en la obtención de los datos de altura, diámetro y número de hojas. .. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 11. Distribución de la precipitación, evaporación y temperatura en el sitio experimental durante el ciclo del cultivo de maíz. Montecillo, Méx. 2006.**Error! Bookmark not defined.**
- Figura 12. Velocidad de Infiltración (I) en el sitio experimental. Montecillo, Méx. 2006..... **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 13. Infiltración acumulada (Z) en el sitio experimental. Montecillo, Méx. 2006..... **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 14. Lámina (cm) contenida en el suelo a las profundidades de 15 y 30 cm, y precipitación (mm) ocurrida durante la etapa del establecimiento.**Error! Bookmark not defined.**
- Figura 15. Lámina aprovechable a la profundidad de 15 cm en la etapa de establecimiento del cultivo..... **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 16. Lámina aprovechable a la profundidad de 30 cm en la etapa de establecimiento del cultivo..... **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 17. Lámina (cm) contenida en el suelo a las profundidades de 15 y 30 cm, y precipitación (mm) ocurrida durante la etapa vegetativa.**Error! Bookmark not defined.**

- Figura 18. Lámina aprovechable a la profundidad de 15 cm en la etapa vegetativa del cultivo. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 19. Lámina aprovechable a la profundidad de 30 cm en la etapa vegetativa del cultivo. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 20. Lámina (cm) contenida en el suelo a las profundidades de 15 y 30 cm, y precipitación (mm) ocurrida durante la etapa de floración. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 21. Lámina aprovechable a la profundidad de 15 cm en la etapa de floración del cultivo. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 22. Lámina aprovechable a la profundidad de 30 cm en la etapa de floración del cultivo. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 23. Lámina (cm) contenida en el suelo a las profundidades de 15 y 30 cm, y precipitación (mm) ocurrida durante la etapa de formación del elote y llenado del grano. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 24. Lámina aprovechable a la profundidad de 15 cm en la etapa de formación del elote y llenado del grano. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 25. Lámina aprovechable a la profundidad de 30 cm en la etapa de formación del elote y llenado del grano. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 26. Lámina (cm) contenida en el suelo a las profundidades de 15 y 30 cm, y precipitación (mm) ocurrida durante la etapa de madurez. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 27. Lámina aprovechable a la profundidad de 15 cm en la etapa de madurez del cultivo. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 28. Lámina aprovechable a la profundidad de 30 cm en la etapa de madurez del cultivo. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 29. Porcentaje de luz Interceptada por el cultivo de maíz, Montecillo. Mex. 2006. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 30. Rendimiento de grano (Kg parcela útil⁻¹) por tratamiento por bloque. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 31. Distribución de la materia seca en porcentaje por planta en cada tratamiento. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 32. Comparación entre tratamientos de la distribución de la materia seca (g). **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 33. Evolución de la variable altura a lo largo de la etapa vegetativa en los tratamientos de estudio. **Error! Bookmark not defined.**

- Figura 34. Número de hojas por tratamiento a lo largo de la etapa vegetativa.**Error! Bookmark**
- Figura 35. Evolución del comportamiento de la variable diámetro del tallo por tratamiento..... **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 36. Gráficas utilizadas en la obtención de K para cada tratamiento.**Error! Bookmark not**
- Figura 37. Comparación de los rendimientos adimensionales de maíz obtenidos ($Y_{real}/6.51$) en diferentes tratamientos de captación de lluvia con los valores calculados ($Y_{calc}/8$) (1) y con los coeficientes hídricos K_{hidr} en el grupo de tratamientos B I-III (2) y en el grupo de tratamientos B II- IV (3).**Error! Bookmark**

ANEXOS

- Cuadro A 1. Cálculo de la probabilidad de lluvia ocurrida en los meses de Junio a Noviembre durante el periodo de 1985 a 2005. Montecillos, México.**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 2. Datos utilizados en la obtención de las curvas de tensión y esfuerzo de humedad del suelo, para las profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm. Montecillo. México. 2006.**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 3. Datos de precipitación ocurrida durante el ciclo del cultivo de maíz. Junio-Noviembre. Montecillo, Méx. 2006.**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 4. Valores del contenido de humedad gravimétrico (gr_{agua}/gr_{suelo}), correspondientes a la profundidad de 0 -15 cm. Etapa fenológica: Establecimiento. Montecillo, Méx. 2006.**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 5. Valores de contenido de humedad gravimétrico (gr_{agua}/gr_{suelo}), correspondientes a la profundidad de 15-30 cm. Etapa fenológica: Establecimiento. Montecillo, Méx. 2006.**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 6. Valores de contenido de humedad gravimétrico (gr_{agua}/gr_{suelo}), correspondientes a la profundidad de 0-15 cm. Etapa fenológica: Vegetativa. Montecillo, Méx. 2006.....**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 7. Valores de contenido de humedad gravimétrico (gr_{agua}/gr_{suelo}), correspondientes a la profundidad de 30 cm. Etapa fenológica: Vegetativa. Montecillo, Méx. 2006.....**Error! Bookmark not defined.**

- Cuadro A 8. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 15 cm. Etapa fenológica: Floración. Montecillo, Méx. 2006.....**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 9. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 30 cm. Etapa fenológica: Floración. Montecillo, Méx. 2006.....**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 10. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 15 cm. Etapa fenológica: Formación del elote y llenado del grano. Montecillo, Méx. 2006.**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 11. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 30 cm. Etapa fenológica: Formación del elote y llenado del grano. Montecillo, Méx. 2006.**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 12. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 15 cm. Etapa fenológica: Madurez. Montecillo, Méx. 2006.....**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 13. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 30 cm. Etapa fenológica: Madurez. Montecillo, Méx. 2006.....**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 14. Datos utilizados en la determinación del valor de K correspondiente al tratamiento A.....**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 15. Datos utilizados en la determinación del valor de K correspondiente al tratamiento B.....**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 16. Datos utilizados en la determinación del valor de K correspondiente al tratamiento C.....**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 17. Datos utilizados en la determinación del valor de K correspondiente al tratamiento D.....**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 18. Contenido de Humedad óptimo del cultivo de maíz por etapa fenológica.**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 19. Valores de K_j por etapa fenológica de los bloques I y III.**Error! Bookmark not defined.**
- Cuadro A 20. Valores de K_j por etapa fenológica de los bloques II y IV.**Error! Bookmark not defined.**

Figura A 1. Curvas de Tensión y Esfuerzo de Humedad del suelo del sitio experimental, Montecillo. México. 2006.....**Error! Bookmark not defined.**

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que se han creado nuevas variedades de híbridos de maíz y mejores técnicas de cultivo, aún no es posible contrarrestar el impacto que puede tener un ciclo de lluvias deficiente, por lo que la incorporación de grandes extensiones de terreno a la producción agrícola se ve limitada.

De este modo, se estima que en las próximas décadas la escasez de agua en el mundo será un serio impedimento para la producción de alimentos, y principalmente de cultivos básicos como lo es el Maíz. Situación que ha sido causada por el crecimiento de la población que ha reducido la disponibilidad de tierra y de agua per cápita (FAO, 2002).

En México, el maíz es el cultivo agrícola más importante, desde el punto de vista alimentario industrial, político y social; en donde, se observa que tiene una participación en la producción total de cereales del 68.6%, con 8.4 millones de hectáreas sembradas para el año 2006, los cuales el 85.5% del total se cultiva en superficie de temporal, proporción que representa 7.2 millones de hectáreas promedio anual (SAGARPA, 2007). Situación que se basa en gran medida a la relación que existe entre la cantidad de agua requerida y la cantidad de lluvia disponible. No obstante, en nuestro país la escasez del agua de lluvia y su mala distribución espacial y temporal, provocan grandes áreas con temporal deficiente para la producción agrícola. Aunado a esto, cada año aumentan las áreas con problemas de erosión en diferentes grados y que entre otras causas, es debido al mal manejo del agua de lluvia (SARH, 1991).

A pesar de que en los últimos años la agricultura mexicana se ha diversificado y de que se han creado nuevas variedades de híbridos de maíz y mejores técnicas de cultivo, aún no es posible contrarrestar el impacto que puede tener un ciclo de lluvias deficiente, por lo tanto, se limita la incorporación de grandes extensiones de terreno a la producción agrícola. Ante esto, resulta urgente la necesidad de hacer



más eficiente el uso del agua a través de la coordinación, generación y estudio de tecnologías que promuevan la conservación del agua y el suelo, como lo es la captación de agua de lluvia *in situ*.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. EL MAIZ

2.1.1. Su origen y adaptación

El maíz, es una planta domesticada del género *Zea*, perteneciente a la familia de las gramíneas, subfamilia *Andropogonácea*, tribu *maidea*, identificada específicamente como: *Zea mayz* L (CDIA, 1980; Llanos, 1984). Es una planta anual, alta, robusta y monoica, con vaina sobrepuesta y limbos anchos conspicuamente dísticos; espiguillas estaminadas en racimos largos que parecen a espigas; los racimos numerosos, formando panículas largas y esparcidas; inflorescencias femeninas, en las axilas de las hojas; las espiguillas en 8 a 16 o hasta 30 hileras en raquiz engrosado y casi leñoso (olote), todo esto encerrado en numerosas brácteas o espatas faláceas (totomoxtle o holoché), los estilos largos saliéndose de la punta, como una masa de hilo sedoso (jilote), los granos en la madurez mucho más largos que las glumas (CDIA, 1980).

Aún cuando es generalmente aceptado el origen americano del maíz, los investigadores no se han puesto de acuerdo sobre si el cultivo se originó en México, en el sur de los Estados Unidos o en algunas regiones de América del Sur o Centroamérica (CDIA, 1980). Sin embargo, la evidencia de hallazgos arqueológicos de polen, mazorcas y granos de maíz en México inclinan a ciertos autores hacia la hipótesis, que para muchos es la más plausible, de que el maíz se originó en el Valle Central de México (Llanos, 1984). Desde su centro de origen en México y Centro América, el maíz emigró al resto de Latinoamérica, El Caribe, Los Estados Unidos y Canadá (Dowswell *et al.*, 1996).

Como la generalidad de las plantas cultivadas, el maíz requiere de condiciones óptimas de suelo y clima para que se logren los más altos rendimientos; sin embargo, la gran diversidad de tipos, razas y nuevas variedades de maíz que actualmente existen en México, permiten que haya maíces adaptados a

prácticamente todas las condiciones que puedan presentarse en el país (CDIA, 1980). Debido a esto se puede encontrar maíz cultivado desde las costas de ambos océanos hasta más de 3000 metros sobre el nivel del mar y con ciclos de producción que van desde 3 hasta 13 meses (Dowswell *et al.*, 1996).

Jiménez (1988), consigna que el cultivo de maíz se adapta a una amplia variedad de suelo. No obstante, Llanos (1984), menciona que los peores suelos para el maíz son los excesivamente pesados (arcillosos) y los muy sueltos (arenosos); los primeros, por su facilidad para inundarse y los arenosos por su propensión a secarse excesivamente. Puede cultivarse con buenos resultados entre pH de 5.5 y 8, aunque el óptimo corresponde a una ligera acidez (pH entre 6 y 7).

Según Doorenbos y Kassam (1986) para la producción de maíz de grano las necesidades de fertilizante son relativamente elevadas, siendo, para las variedades de alta producción, hasta de 200 kg de N ha⁻¹, de 50 a 80 kg de P ha⁻¹, y de 60 a 100 kg de K ha⁻¹.

En lo que se refiere a requerimientos de temperatura tolera de moderadas a calientes. El límite inferior para su crecimiento está entre 10 y 12 °C. El límite superior más favorable para el crecimiento depende de la humedad disponible. Cuando es abundante, el maíz crecerá bien a temperaturas máximas entre 30 y 32 °C, pero en condiciones normales de campo, las temperaturas máximas entre 30 y 32 °C son cercanos a lo óptimo (CDIA, 1980).

La cantidad total de lluvia caída durante el período vegetativo y, más aún, su distribución a lo largo del mismo, son fundamentales para el crecimiento y el rendimiento en grano de maíz. Sin embargo, el umbral mínimo de precipitación desde el cual puede esperarse cosecha de grano es 150 mm. A partir de ahí pueden estimarse en promedio rendimientos de 730 kilos ha⁻¹ de forraje y 300 kilos ha⁻¹ de grano, por cada 25 mm de lluvia adicionales.

Así también, el maíz es una de las plantas cultivadas de más alto nivel de respuesta a los efectos de la luz. De este hecho depende principalmente su elevado potencial productivo. Correlativamente, la falta o reducción de la luz inciden sobre su crecimiento y rendimiento. Una disminución de un 90 por ciento de la intensidad lumínica por período de unos pocos días produce la máxima reducción en el rendimiento en grano si se produce durante la fase de polinización (Llanos, 1984).

2.1.2. Requerimientos hídricos

Se considera al maíz más eficiente que la mayoría de los cultivos para el aprovechamiento de la humedad, requiere 370 partes de agua para producir una parte de materia seca en grano y rastrojo; lo anterior, indica que las necesidades de agua del cultivo en condiciones óptimas de 800 a 1200 mm, durante su ciclo vegetativo (CDIA, 1980; Doorenbos y Kassam, 1986). No obstante, Llanos (1984) menciona que con 150 mm de precipitación pueden esperarse cosechas de grano.

Duarte (1985) menciona que en condiciones de temporal deficiente en la Cuenca del Valle de México, obtuvo los máximos rendimientos de grano de maíz por hectárea, con una precipitación en el año de estudio de 435 mm; aún y que Chapman y Carter (1986) señalan que para que prospere bien el maíz necesita durante su ciclo biológico de 510 a 1020 mm; sin embargo, estas necesidades hídricas van a depender de factores como son las condiciones ambientales y las características de la planta principalmente (López, 1995).

FAO (1997), menciona que existen diferencias muy marcadas en los requerimientos del cultivo y de las condiciones donde se establezcan como lo son el suelo, variedad utilizada, ciclo de vida, pero en general para el caso del maíz se necesitan de 500 a 800 mm. Así también, Reyes (1990) coincide en que el total de agua usada en la evapotranspiración fluctúa considerablemente de acuerdo a

los siguientes factores: duración del ciclo vegetativo, clima, disponibilidad de agua, características hidrodinámicas del suelo y prácticas de manejo del sistema agua-suelo-planta y, en donde se requieren un promedio de 400 a 800 mm para el ciclo de producción de maíz.

Robles (1979) indica que bajo condiciones de temporal y con variedades adaptadas, se pueden tener buenos rendimientos con más o menos 500 mm de precipitación distribuidos durante el ciclo vegetativo y a medida que la precipitación disminuye acercándose a 300 mm el rendimiento se abate rápidamente.

Guevara (1988) consigna que en las regiones de temporal los mejores rendimientos de maíz se obtienen con precipitaciones que van de 800 – 900 mm para altitudes de 1400 msnm o mayores y de 900 – 1300 mm para altitudes a pocos metros sobre el nivel del mar. Por otra parte, Soto y Martin (1989) establecieron un trabajo con maíz de temporal empleando 6 fechas de siembra con el propósito de obtener los requerimientos pluviométricos de tres materiales genéticos de maíz en Yucatán, encontraron que los rendimientos más altos se obtuvieron con lluvias que fluctuaron de 716 – 810 mm.

Mora (1990) al evaluar tamaños de microcuencas y distancia entre contras con condiciones de temporal y con 227.3 mm de precipitación obtuvo un rendimiento promedio grano de maíz de 229 kg ha⁻¹.

Luna *et al.*, (2005) encontró que con precipitaciones de 183 mm produjeron 713 kg ha⁻¹ de grano de maíz en Madero, Durango y con mayores precipitaciones registradas en Etlá, Oaxaca de 425 mm obtuvieron rendimientos de 1705 kg ha⁻¹ y en Calera, Zacatecas con 250 mm, se tuvo un rendimiento de 987 kg ha⁻¹.

2.1.3. Producción e importancia del maíz en México

Según Dowsell *et al.*, (1996), México ocupó el cuarto lugar como país productor de maíz a nivel mundial, con 14 600 millones de toneladas para el año de 1992 y para el año 2000 con 18 324 millones de toneladas métricas, y en el continente Americano se ubicó en tercer lugar, después de Estados Unidos y Brasil (FAO, 2001). No obstante, Vega y Ramírez (2004) mencionan que en los últimos 20 años el nivel de producción de maíz más bajo se ubicó en el año de 1982 con 10.1 millones de toneladas, sin embargo, para el año 2006 se obtuvo una producción de 21.9 millones de toneladas. Es por ello, que el maíz es el cultivo agrícola más importante de México, desde el punto de vista alimentario industrial, político y social; en donde, se observa que el maíz tiene una participación en la producción total de cereales del 65 % (figura 1) para el año 2006 (SAGARPA, 2007). De acuerdo con Robles (1990) en México se calcula que esta especie cubre alrededor del 51 % del área total que se encuentra bajo cultivo. Así también Abecenraje (1974), menciona que el maíz ha sido cultivado en México desde antes de la llegada de los Españoles por lo que se considera un alimento básico en la alimentación.

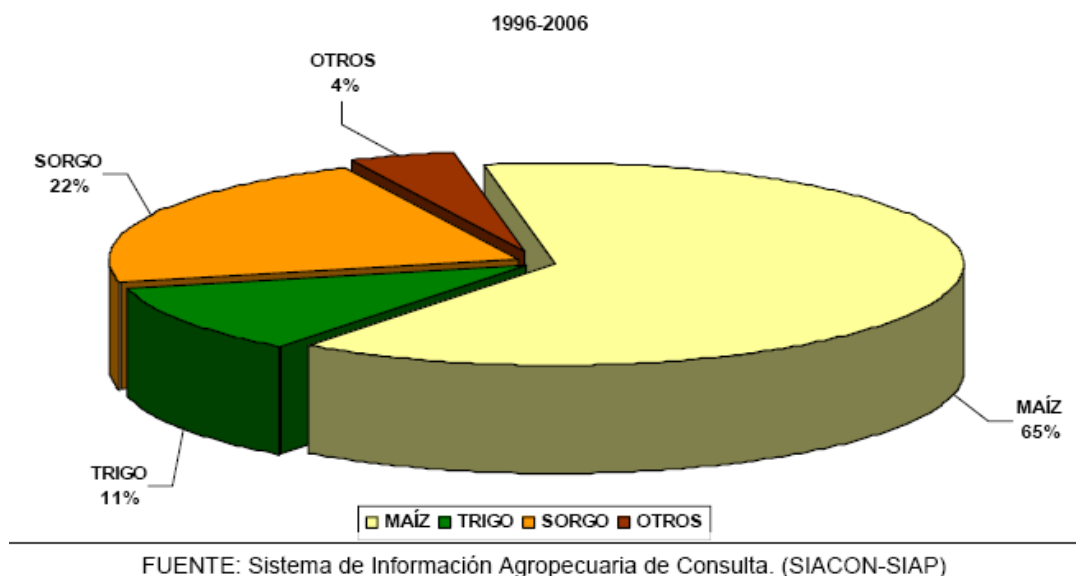


Figura 1. Participación de la producción del maíz en la producción de cereales.

González (1995); menciona que del total del maíz utilizado en el país, 59 por ciento se consume en tortillas, el 36 por ciento se destina a otros usos (animal y semillas) y el 5 por ciento es procesado por la industria almidonera; el consumo per cápita es de 300 g día^{-1} , con lo cual se aporta el 56 por ciento de las calorías y el 47 por ciento de las proteínas de la alimentación del mexicano. En áreas rurales, estos porcentajes se incrementan al 70 % y 56 % de calorías y proteínas, respectivamente.

Para el período 1996 – 2000, el volumen de producción promedio anual de este grano fue equivalente a 17,881.2 miles de toneladas. Mientras que en el quinquenio 2001 – 2006 se alcanzó un volumen promedio anual de 20, 521.5 miles de toneladas, es decir, se obtuvieron 2, 640 miles de toneladas más en el segundo período, registrando una variación e 14.8% con respecto al primero. Lo anterior se explica por el avance que se manifiesta de manera preponderante en la producción durante los años 2001, 2003, 2004 y 2006, cuando se observan incrementos de 14.7, 7.7, 4.0 y 13.6 %, respectivamente, en comparación con el año previo a cada año referido (2000, 2002, 2003 y 2005). Durante el periodo 1996 – 2006 se produjo un promedio anual de 19.3 millones de toneladas de maíz, que incluye maíz blanco, amarillo y otros, con una valor promedio anual de 29, 090 millones de pesos corrientes (SAGARPA, 2007).

La superficie sembrada promedio anual durante el periodo de 1996 a 2006 fue equivalente a 8.4 millones de hectáreas, de las cuales el 88 % corresponden al ciclo Primavera – Verano, proporción que representa 7.4 millones de hectáreas promedio anual y el 12 % al ciclo Otoño – Invierno, es decir, 1.0 millón de hectáreas promedio anual. Por lo que se refiere a la modalidad hídrica, el 85.5% del total se cultiva en superficie de temporal, proporción que representa 7.2 millones de hectáreas promedio anual; mientras que un millón 217 mil hectáreas se siembran bajo condiciones de riego, que representa 14.5 % del total. El 77 % del volumen total producido de maíz se obtiene en la modalidad de temporal, participación que del año 1996 a 2006 alcanza una cifra promedio anual de 11,

665.5 miles de toneladas; bajo esta modalidad, Veracruz es el principal productor, cuya aportación es de 302.3 miles de toneladas promedio anual, es decir, 41 % del total producido en este régimen hídrico; seguido por Chiapas y Oaxaca, con 14.5 y 13.4 % del total, respectivamente.

La producción de este grano está diseminada en todo el territorio nacional; sin embargo, cinco entidades de la República contribuyen con el 55 % de la producción total promedio anual (19.3 millones de toneladas) de temporal y riego, siendo los principales estados productores, en orden de importancia: Jalisco con 15.4 %, Sinaloa, con 14.4 %; Estado de México con el 9.9 %; Chiapas, 9 %, y Michoacán con el 6.5 %. La producción conjunta de estos estados es equivalente a 10, 652.3 miles de toneladas (SAGARPA, 2007).

En lo que se refiere al rendimiento por hectárea, SAGARPA (2007) reporta que los mayores rendimientos se obtienen bajo condiciones de riego, tanto en el ciclo Otoño- Invierno como en Primavera – Verano; con 7.841 y 5.685 ton ha⁻¹, respectivamente. Mientras que en condiciones de temporal se obtienen rendimiento de 1.649 y 2.151 ton ha⁻¹; en ese orden.

No obstante, Llanos (1984) menciona que rendimiento del maíz, depende de muchos factores, como son fertilidad, variedad, tipo de suelo, temperaturas del medio, uso de tecnología, etc., y en donde, en el año de 1981 reporta un rendimiento promedio para Centroamérica de 5.599 ton ha⁻¹. Asimismo, Tanaka y Yamaguchi (1981) consignan que algunos factores como fecha de siembra, interacciones entre distancia de siembra, niveles de nitrógeno, humedad, variedad y condiciones del clima afectan el rendimiento de grano, que puede estar desde 2 hasta 10 ton ha⁻¹.

Al respecto, Luna *et al.*, (2005), al evaluar 20 variedades de maíz en condiciones de temporal en la región semiárida y árida del Centro – Norte de México observó que el mayor rendimiento lo encontró en Etna, Oaxaca con 1.5 ton ha⁻¹, con un

ciclo del cultivo de 82 días; asimismo, el menor fue en Madero, Durango con 0.713 ton ha⁻¹, con un ciclo del cultivo de 55 días.

Por otra parte, Concepción *et al.*, (2005) al evaluar dos fechas de siembra 27 de marzo de 2002 (riego) y 25 de junio de 2001 (temporal) en Celaya, Guanajuato; encontró rendimientos de 12.4 y 11.1 ton ha⁻¹, respectivamente. Se observa con ello 1.3 t ha⁻¹ menos en condiciones de temporal versus con riego.

En otro estudio realizado por Ramírez *et al.*, (2004) en el estado de Jalisco en condiciones de temporal con diferentes cruza de maíz blanco con amarillo concretó que la cruza INIFAP – Amarillo Dendato – 1 x INIFAP – Amarillo Cristalino - 1 mostró el mejor patrón heterótico con 7.169 ton ha⁻¹.

Espinoza *et al.*, (2004) al estudiar cuatro genótipos en el ciclo Otoño – Invierno en condiciones de temporal en Lerdo, Durango encontró el mejor rendimiento promedio para el genotipo H - 419 con 1.928 ton ha⁻¹ y el menor para el genotipo Blanco Hualauises con 1.206 ton ha⁻¹.

2.2. CAPTACION DE AGUA DE LLUVIA

2.2.1. Definiciones

Tovar (1977) indica que la captación de agua de lluvia se basa en el manejo del suelo, mediante la construcción de bordos, surcos y canales, además del uso de tratamientos que impermeabilizan a esta superficie para inducir escurrimientos hacia un área determinada, la cual ha sido previamente acondicionada para retener o almacenar agua. Dicha técnica está conformada por un área de raíces y otra de escurrimiento; El **área de escurrimiento** tiene como función captar al agua de lluvia que cae sobre ella e inducir este flujo de agua, por desnivel, al área de raíces. Ésta debe estar libre de obstáculos, el suelo debe ser uniforme, compacto o impermeable y, el **área de raíces o de almacenamiento** es donde el cultivo se desarrolla, por lo tanto debe reunir ciertas características como buena

capacidad de infiltración y alta capacidad de retención de humedad, para propiciar un óptimo desarrollo radical del cultivo.

De acuerdo con Anaya (1988) la microcaptación de agua de lluvia con fines agrícolas se refiere a su recolección, conducción y almacenamiento en la zona de las raíces. Este sistema está formado por un área de escurrimiento, canales de conducción, y área de almacenamiento. Llegan a abarcar grandes extensiones de terrenos, en donde el área de escurrimiento es mayor al área de almacenamiento de donde se proporciona el agua al cultivo cuando la necesidad es apremiante.

Dentro de la técnica de captación *in situ* del agua de lluvia existen algunas prácticas de producción para conservar la humedad del suelo en el área de siembra y hacer más eficiente el aprovechamiento del agua de lluvia; dentro de estas prácticas pueden estar la colocación superficial de coberturas orgánicas (Lara y Lasso, 1990) o el manejo de la densidad de población en el área de siembra a través de cierta superficie por planta (Martínez, 1985) o por determinado volumen de agua por planta (Osorio, 1989).

El sistema de captación de agua de lluvia consiste en dedicar una parte del terreno al escurrimiento del agua y otra parte del terreno a almacenar el agua que previamente escurrió (ambas áreas deben estar acondicionadas para que cumplan con sus objetivos), así, como ejemplo de un sistema de captación se tiene la cuenca de aportación de una presa, en donde la cuenca representa el área de escurrimiento y el vaso de la presa constituye el área de almacenamiento. La captación *in situ* del agua de lluvia se diferencia de la captación general básicamente de tres aspectos (SARH, 1991):

- a) Porque el sistema de captación se realiza exclusivamente para emplearlo en cultivos básicos, forrajeros, industriales, vegetación nativa y frutales.
- b) Porque el área de escurrimiento (Ae), está formada por microcuencas que aportan cantidades adicionales de agua y no tienen que conducirla a

grandes distancias, ya que dicha área está adyacente al área destinada al almacenamiento.

- c) Porque el área de almacenamiento (A_s), es el mismo suelo, en el cual se desarrollan las raíces de los cultivos.

Como ya se mencionó anteriormente, el sistema de microcaptación *in situ* de agua de lluvia con fines agrícolas, está integrado por dos componentes: área de siembra, que también recibe las denominaciones de área de raíces o área de almacenamiento por ser ésta la zona en la que se desarrolla el sistema radical del cultivo, sea cultivo en hilera, cultivo denso o cultivo individual, sus dimensiones dependen del diámetro de exploración de las raíces. Para fines prácticos se ha denominado como área de siembra o área de almacenamiento al espacio o volumen de suelo que recibe el agua aportada por el área de escurrimiento más la lluvia que se precipita sobre ella directamente y que a la vez corresponde al espacio en el que se desarrolla el sistema radical de los cultivos. Este espacio o volumen de suelo está delimitado por lo que se conoce de manera general como área de siembra y la profundidad del suelo. Esta área debe reunir varias condiciones: su ubicación debe estar aguas debajo de la microcaptación, tener la suficiente profundidad para el desarrollo adecuado del sistema radical y conjuntamente con la capacidad de retención de humedad, almacenar suficiente cantidad de agua para abastecer al cultivo durante periodos de sequía, principalmente en las etapas críticas del cultivo (Tovar, 2001).

El área de escurrimiento debe ubicarse aguas arriba, tener una pendiente uniforme, baja infiltración y alto coeficiente de escurrimiento, lo cual se puede lograr con prácticas mecánicas o el uso de inductores de escurrimiento. Las características que deben reunir las áreas de escurrimiento y de siembra varían de acuerdo a la topografía, rugosidad de la superficie, textura, pendiente, tamaño de cada área, coeficiente de escurrimiento, velocidad de infiltración, tipo de cultivo, intensidad de la lluvia, arreglo topológico y micro relieve.

2.2.2. Antecedentes

Desde sus comienzos el hombre aprovecha el agua superficial como primera fuente de abastecimiento, consumo y vía de transporte, el valle de los ríos es el lugar escogido para establecer las primeras civilizaciones, allí el hombre aprende a domesticar los cultivos y con ello encuentra la primera aplicación al agua de lluvia; pero no depende directamente de ella para su supervivencia debido a la presencia permanente del agua superficial. No obstante, cuando las civilizaciones crecieron demográficamente y algunos pueblos debieron ocupar zonas áridas y semiáridas del planeta comenzó el desarrollo de formas de captación de aguas de lluvias, como alternativa para el riego de cultivos y el consumo doméstico (Ballén *et al.* 2004).

La captación de agua de lluvia se desarrolló como un arte de los Nabateanos hace 2000, años. Ellos vivían en el desierto de Negev que se extiende desde Damasco hasta lo que ahora es Arabia Saudita. Fueron capaces de producir cultivos para sus pueblos y para las caravanas que cruzaban sus territorios, en el desierto donde prevalecía una lluvia anual de menos de 100 mm, la cual era captada en pequeñas presas, terrazas y almacenando el agua escurrida en depósitos (Anaya *et al.*, 1973).

En cuanto a los sistemas de **microcaptación *in situ*** de agua de lluvia, éstos han sido utilizados desde 4000 años a.C., en regiones de escasa precipitación, su uso ha sido cíclico en función de cambios drásticos de culturas, climáticos o tecnológicos, a la fecha ante la presión por el uso de la tierra, la creciente demanda de alimentos debido al aumento en la demografía, ha motivado a que las instituciones de investigación de varios países nuevamente se interesen por estos sistemas como una alternativa para solucionar algunos problemas de falta de agua que se necesita para cubrir la demanda con fines de consumo humano, abrevadero o agrícolas (Tovar, 2001).

En las zonas altas de Yemen donde las lluvias son escasas, se encuentran edificaciones (templos y sitios de oración) que fueron construidas antes del año 1, 000 a. C., que cuentan con patios y terrazas utilizadas para captar y almacenar agua de lluvia.

Durante la República Romana (siglos III y IV a. C.) la ciudad de Roma en su mayoría estaba ocupada por viviendas unifamiliares denominadas “la Domus” que contaba con un espacio principal a cielo abierto (“atrio”) y en él se instalaba un estanque central para recoger el agua de lluvia llamado “impluvim”, el agua de lluvia entraba por un orificio en el techo llamado “compluvim”. En Loess Plateau en la provincia de Gansu en China existían pozos y jarras para la captación de agua de lluvia desde hace más de 2, 000 años. En Irán se encuentran los “arbans”, los cuales son los sistemas tradicionales locales para la captación y almacenamiento de aguas de lluvia.

En Centroamérica se conoce el caso del Imperio Maya donde sus reyes sostenían a sus pueblos de modo práctico, ocupándose de la construcción de obras públicas. Al sur de la ciudad de Oxkutzcab, Estado de Yucatán, México, en el pie de la montaña Psuc, en el siglo X a.C. el abastecimiento de agua para la población y el riego de los cultivos se hacía a través de una tecnología para el aprovechamiento de agua de lluvia, el agua era recogida en un área de 100 a 200 m² y almacenada en cisternas llamadas “Chultuns”, estas cisternas tenían un diámetro aproximado de 5m, y eran excavadas en el subsuelo e impermeabilizadas con yeso. En otras zonas de las tierras bajas, como en Edzná, en Campeche, los pobladores precolombinos de esta ciudad construyeron un canal de casi 50 m de ancho y de 1 m de profundidad para aprovechar el agua de lluvia, este canal proporciona agua para beber y regar los cultivos (Ballén *et al.*, 2004)

También existen evidencias de que en América se utilizaron complejos sistemas de manejo de agua desde el Norte, hasta la meseta de los Andes, incluyendo el

Parque Nacional de Mesa Verde al Suroeste de Colorado, el Valle de México y Oaxaca. En México, existen vestigios de que en la época precolombiana desarrollaron estas técnicas los Zapotecas en la región de Oaxaca y los Acolhuas en Texcoco, para lo cual utilizaban terrazas con el fin de aprovechar de un modo integral el suelo y el agua de lluvia. Así también la preocupación de los Aztecas, Xochimilcas y Texcocanos y de los primeros pobladores de Casas Grandes, Chi., por conservar y aprovechar el agua de lluvia es evidente, ya que para cultivar pequeñas áreas planas construyeron obras rudimentarias para abastecer la demanda de agua de sus cultivos (CONAZA, s/a).

En México, a partir de los 70's se iniciaron los estudios en este tema en algunas instituciones como el Colegio de Postgraduados. Principalmente se ha trabajado en los siguientes aspectos: encontrar la relación óptima entre el área de siembra y el área de escurrimiento, uso de coberturas para inducir el escurrimiento o para reducir la evaporación en microcaptaciones, diferentes tamaños de sistemas de microcaptación, creación de implementos para la construcción de microcuencas, modelos para estimar el tamaño de microcuenca, uso de sustancias o materiales que incrementen la eficiencia en el área de escurrimiento, sistema de labranza. Los resultados obtenidos han estado en función de la cantidad y distribución de lluvia (Tovar, 2001). De acuerdo con Anaya (1990) desde 1972 a la fecha, la Sección de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados ha establecido experimentos de campo sobre captación "*in situ*" del agua de lluvia, métodos de labranza, prácticas de conservación de suelos y de la humedad en el perfil del suelo; dichos trabajos se han llevado a cabo en terrenos de la Escuela Nacional de Agricultura, ahora la Universidad Autónoma Chapingo, así como, en otros estados de la República Mexicana tales como: Oaxaca, Puebla, Estado de México, Hidalgo, San Luis Potosí, Aguascalientes y Durango. Los cultivos bajo estudio han sido: Durazno, nopal, rábano, girasol, cebada, maíz, forrajero y para grano, sorgo, soya y frijol (Anaya, 1973^a; Anaya, 1973^b; Anaya, 1974).

2.2.3. Ventajas y desventajas de la captación de agua de lluvia

Ventajas

- La captación de agua de lluvia *in situ*, reduce los riesgos de sequía en los cultivos al aumentar el agua disponible para las plantas (INIFAP, 2002).
- El sistema de microcaptación se establece simultáneamente con la escarda y mientras más oportuno sea, hay más posibilidades de captar los eventos de lluvia intensos. Piletas bien conformadas pueden retener hasta 50 mm de lluvia.
- Es una práctica de conservación de suelo al reducir los riesgos de erosión causados por el escurrimiento superficial y propiciar el desarrollo de la cubierta vegetal, la cual protege al suelo del impacto de las gotas de lluvia.
- Permite incrementar los rendimientos del cultivo de maíz de temporal hasta en un 30 por ciento (Gallegos, 2004).
- Mejoran la eficiencia en la utilización de los recursos lluvia, suelo, planta y microambiente en la agricultura de temporal, lo cual hace que los sistemas de producción sean permanentes (Anaya, 1990).
- En algunos sistemas de captación de agua se reduce la erosión causada por el agua.

Desventajas

- La viabilidad del uso de los sistemas de microcaptación *in situ* dependen de la cantidad, oportunidad y distribución de la lluvia durante el ciclo del cultivo, se ha encontrado que su aporte de agua al suelo puede ser de 400 mm o más (Tovar, 2001).
- Los sistemas de microcaptación *in situ*, para su establecimiento y eficacia requieren de suelos con profundidad mínima de un metro y con alta capacidad de retención de humedad.
- Se requiere de cultivos con características genéticas adecuadas para su desarrollo bajo condiciones de baja humedad y adaptadas a condiciones de déficit de agua en el ciclo del cultivo.

- El costo de la infraestructura para almacenar y desviar las corrientes debe estar al alcance de los productores.
- Dado lo errático y aleatorio de la lluvia en muchas ocasiones es necesario contar con almacenamientos superficiales aguas arriba de la superficie bajo cultivo, con el objeto de contar con un riego suplementario en etapas críticas del ciclo vegetativo (Anaya, 1990).

2.2.4. Factores que determinan la captación de agua de lluvia

Cuando se aplican las técnicas de microcaptación de agua de lluvia con fines agrícolas, el objetivo principal es recolectar el agua, conducirla y almacenarla dentro del suelo. Este almacenamiento será el área de raíces; por lo que es aconsejable mejorar las condiciones de suelo en esta área para que alcance la máxima cantidad de agua posible (Tovar, 1977).

Así también Ortiz (1975) consigna que para que el sistema de microcaptación sea eficiente, debe estar en función de las características regionales de lluvias; por lo que es indispensable contar con información sobre éstas, para así diseñar la metodología más apropiada a las condiciones climáticas y edáficas de la zona; así como la selección del cultivo, el cual debe estar acorde a la cantidad y distribución de la lluvia. También, menciona que tiene gran importancia el agua aportada por el área de escurrimiento a la zona de raíces, ya que, si se presentan irregularidades en la distribución de las lluvias, el suelo tiene humedad de reserva, la cual puede aprovechar la planta para su consumo sin que sea una limitante para su desarrollo normal.

De acuerdo con Evenari *et al.* (1971) y FAO (1997) señalan que antes de instalar un sistema de captación de agua, se deben conocer los siguientes aspectos de la región:

a) El suelo.

Generalmente, las características del suelo bajo sistemas de captación de agua de lluvia, deberían ser las mismas que aquellas para irrigación. Idealmente el suelo en el área de captación debería tener un coeficiente de escurrimiento superficial alto, mientras el suelo en el área del cultivo debería ser profundo y fértil. Así pues, los aspectos del suelo que afectan el desarrollo de la planta bajo sistemas de captación de agua de lluvia que debe ser considerado, son los siguientes:

- ✓ Tipo de suelo o textura. La capacidad de infiltración depende de la textura y estructura del suelo, propiedades que determinan la porosidad y, por ende, la capacidad de almacenamiento de agua. Es por ello, que la porosidad difiere de un suelo a otro. Las más altas capacidades de infiltración son observadas en suelos arenosos sueltos, mientras que la arcilla pesada o suelos limosos poseen capacidades de infiltración considerablemente más pequeñas. Los suelos con alto contenido de arcilla o de limo son los más sensibles para formar una capa baja con poca capacidad de infiltración. En suelos arenosos, el efecto de taponamiento es comparativamente pequeño.
- ✓ Estructura. La estructura del suelo se refiere al agrupamiento de partículas de suelo en agregados y al arreglo de éstos. Una buena estructura del suelo está generalmente asociada con el suelo franco y un contenido relativamente alto de materia orgánica. Sin embargo, bajo condiciones cálidas, los niveles de materia orgánica son frecuentemente bajos, debido a las tasas rápidas de descomposición. La aplicación de materiales orgánicos como residuos de cultivo y estiércol es de gran ayuda para mejorar la estructura.
- ✓ Profundidad. La profundidad del suelo es particularmente importante donde el sistema de captación de agua de lluvia se ha propuesto. Los suelos profundos tienen la capacidad de almacenar el escurrimiento superficial captado, así como ofrecer una mayor

cantidad de nutrientes totales para el crecimiento de la planta. Los suelos con menos de un metro de profundidad son poco apropiados para la captación de agua de lluvia. Dos metros de profundidad o más es ideal, aunque raramente se encuentra en la práctica.

- ✓ Salinidad y Sodicidad. Los suelos sódicos que tengan un alto porcentaje de sodio intercambiable y los suelos salinos que tengan sales solubles en exceso, deberán evitarse para sistemas de captación de agua de lluvia. Estos suelos pueden reducir la disponibilidad de humedad directamente o indirectamente, así como ejercer una influencia dañina sobre el crecimiento de la planta.

b) Vegetación. La cantidad de lluvia perdida por la intercepción del follaje depende del tipo de vegetación y de su etapa de crecimiento. Los valores de intercepciones están entre 1 y 4 mm. Por ejemplo, los cultivos de cereales, tienen una capacidad de almacenamiento más pequeña que una cubierta densa de pasto. Más significativo es el efecto que tiene la vegetación sobre la capacidad de infiltración del suelo. Una cubierta de vegetación densa protege el suelo del impacto de las gotas de lluvia y reduce el efecto del encostramiento. En conclusión, un área densamente cubierta con vegetación, produce menos escurrimiento superficial que un área descubierta.

c) Pendiente y tamaño de área de captación. Las investigaciones sobre escurrimiento superficial en lotes experimentales han mostrado que parcelas con fuertes pendientes producen más escurrimiento superficial que aquellas con pendientes suaves. Además, se observó que, para una pendiente dada, la cantidad de escurrimiento superficial disminuye con el incremento en su longitud. Esto es principalmente debido a la reducción en la velocidad de flujo, y subsecuentemente a un mayor tiempo de concentración (definido como el tiempo necesario para que una gota de agua alcance la salida de un área de captación de la ubicación más lejana

en el área de captación). Esto significa que el agua está expuesta a una duración más larga de tiempo a infiltración y a evaporación antes de que alcance el punto de medición.

Lo mismo se aplica cuando se comparan áreas de captación de diferentes tamaños. La eficiencia de escurrimiento superficial (volumen de escurrimiento superficial por unidad de área) aumenta con la disminución del tamaño del área de captación; es decir a mayor tamaño del área de captación es mayor el tiempo de concentración y más pequeña la eficiencia del escurrimiento superficial.

d) Características de precipitación. De ser posible conocer la precipitación total, su distribución y frecuencia a través del año, en virtud de que ambos cambian entre un año y otro. De acuerdo con Anaya (2001) sugiere que para el caso de la precipitación, el análisis de los datos registrados en cuanto a los puntos que a continuación se mencionan: Distribución y cantidad; estudio de la frecuencia e intensidad; predicción a corto y largo plazo; comparación de la cantidad y distribución de la lluvia con las necesidades hídricas de los cultivos de la región.

e) Aspectos climáticos y meteorológicos en general. La radiación, temperatura del aire, viento y humedad interaccionan todos simultáneamente con la planta, en tal forma que no es posible conocer el efecto de uno de ellos sin especificar el estado de los otros, Coombs, *et al.* (1988).

2.2.5. Tipos de captación de agua de lluvia

De acuerdo con Carranza (1973), Tovar (1975) y Anaya (2001), existen varias tecnologías para captación *in situ* del agua de lluvia, en donde clasifican a tres diferentes formas para diferentes métodos de siembra de acuerdo al cultivo, los cuales son: Cultivos en hileras, como el maíz, frijol, girasol; cultivos tupidos, como

avena, trigo; cultivos individuales como frutales y arbustos forrajeros o industriales como durazno y pistache.

Por otra parte FAO (1997) clasifica de manera más completa las tecnologías de captación de agua de acuerdo a su uso, a las condiciones y limitantes del medio físico, y las define de la siguiente manera:

- a) Microcaptación tipo “Negarim”.** Esta técnica fue desarrollada en el desierto de Negev de Israel. La microcaptación tipo Negarim es en forma de diamante, cuya base está rodeada por bordos pequeños de tierra (con un tamaño recomendable de al menos 25 cm de altura), con un hoyo de infiltración en la esquina más baja de cada uno. El escurrimiento superficial se colecta desde el interior de la base y se almacena en el hoyo de infiltración. La microcaptación es utilizada principalmente para árboles o arbustos. Además de captar agua de lluvia para los árboles, conserva simultáneamente el suelo. La microcaptación tipo Negarim es precisa y relativamente fácil de construir.

Su adaptabilidad puede ser donde se presenta lluvias tan bajas como hasta de 150 mm por año, la profundidad del suelo debería tener al menos 1.5 m para garantizar el desarrollo radical adecuado y para almacenar el agua captada, con una pendiente menor al 5%.

La limitante que presenta este tipo de captación de agua de lluvia es que una vez que los árboles son plantados, no es posible operar y cultivar con máquinas entre las líneas de árboles. No es de fácil mecanización y por lo tanto se limita a pequeña escala.

- b) Bordos al contorno para árboles.** Los bordos al contorno para árboles son una forma simplificada de microcaptaciones. La construcción puede ser mecanizada y la técnica es por lo tanto apropiada para la instrumentación en una mayor escala. Como su nombre lo dice, el bordo sigue el contorno, en espacios cerrados y con la formación de pequeñas represas de tierra, el sistema queda dividido en microcaptaciones individuales. Con o sin

mecanización, este sistema es más económico que la microcaptación tipo Negarim, particularmente por la instrumentación a gran escala en tierra uniforme, puesto que se moverá menos tierra. Una segunda ventaja de bordos al contorno es su adaptabilidad para la producción de cultivos o de forraje entre los bordos.

Esta forma de captación de agua de lluvia se adapta bien a zonas áridas o semiáridas con precipitaciones de 200 a 270 mm. La profundidad del suelo que debe tener este tipo de sistema es de al menos 1.5 m y con pendiente menor al 5%. A diferencia del tipo Negarim, este sistema requiere que el suelo debe ser uniforme, sin cárcavas o canalillos.

Las limitantes que presentan los bordos al contorno es que no son adecuados para terrenos irregulares y erosionados, ya que los bordos se pueden romper al presentarse lluvias de alta intensidad.

c) Bordos al contorno (microcuencas) para cultivos. Las represas al contorno, algunas veces llamadas surcos al contorno o microcuencas, son utilizados para la producción de cultivos. Los surcos siguen el contorno a un espaciamiento de 1 a 2 metros. El escurrimiento superficial es captado de la faja no cultivada entre bordos y almacenada en un surco justamente sobre el bordo. Los cultivos se colocan en ambos lados del surco. El sistema es simple y puede construirse en forma manual ó con maquinaria. Una de las ventajas más importantes de este sistema es que el crecimiento de los cultivos es uniforme debido a que cada planta tiene aproximadamente la misma área de captación.

Se adapta en condiciones de lluvia de entre 350 a 750 mm, asimismo, todos los suelos son aptos para este sistema. Una posible desventaja es que los suelos deben ser uniformes, deben evitarse las áreas con cárcavas u ondulaciones. Así también, los bordos al contorno se limitan a áreas con lluvia relativamente alta, debido a que la cantidad de escurrimiento captado es comparativamente pequeña debido al área reducida de captación.

d) Bordos trapezoidales. Los bordos trapezoidales son utilizados para confinar grandes áreas (hasta una ha) para concentrar mayores cantidades

de escurrimiento superficial, el cual es captado de un área de captación externa o “de pendiente larga”. El nombre se deriva del diseño de una estructura que tiene la forma de un trapecio, un bordo base conectado a dos lados con bordos o a las paredes externas que se extienden aguas arriba en un ángulo generalmente de 135°. Los cultivos son colocados dentro de un área confinada. Las ventajas principales de esta técnica son la simplicidad de diseño y construcción con el mínimo mantenimiento requerido. Los bordos trapezoides pueden ser utilizados para cultivos, árboles y pastos.

Se adapta a precipitaciones de 250 a 500 mm, la necesidad de suelos principalmente que no se agrieten y que tenga alto contenido de arcilla, con pendientes que van des 0.25% a 1.5%, pero lo más apropiados es que sean menores a 0.5%.

La principal limitante que presenta este sistema de captación es que esta limitada a terrenos con baja pendiente. La construcción de bordos trapezoides sobre pendientes mayores a 1.5 % es técnicamente posible, pero involucra grandes cantidades de terraplén, lo cual la hace prohibitiva.

- e) **Bordos de piedra al contorno.** Los bordos de piedra al contorno son utilizados para reducir el escurrimiento superficial, favorecer la infiltración y capturar sedimentos. La captación de agua y sedimento, conlleva directamente a un mejor desarrollo del cultivo. Esta técnica es apropiada para la aplicación en pequeña escala en campos agrícolas, ya que con un abasto adecuado de piedras, puede instrumentarse rápidamente y a bajo precio.

Los bordos de piedra para la producción de cultivos se adaptan a las siguientes condicionantes: Con lluvias de 200 a 750 mm en zonas áridas y semiáridas, con pendientes menores a 2% y en donde exista disponibilidad de piedras.

- f) **Presas permeables de piedra.** Las presas permeables de piedra son una técnica de cultivo de inundación donde las aguas de escurrimientos superficiales son esparcidas en los fondos de los valles para mejorar la

producción de cultivos. Al mismo tiempo se controla el desarrollo de las cárcavas. Las estructuras son típicamente largas, con paredes de baja altura a través de los valles.

Este tipo de técnicas se adapta a suelos agrícolas en donde generalmente los más pobres se mejoran por el tratamiento; con precipitaciones de 200 a 750 mm y con pendientes por debajo de 2% con la finalidad de lograr una mejor distribución del agua de lluvia.

La limitación principal de las presas permeables de piedra es que son para sitios específicos y requieren de considerables cantidades de piedra así como la provisión de transporte.

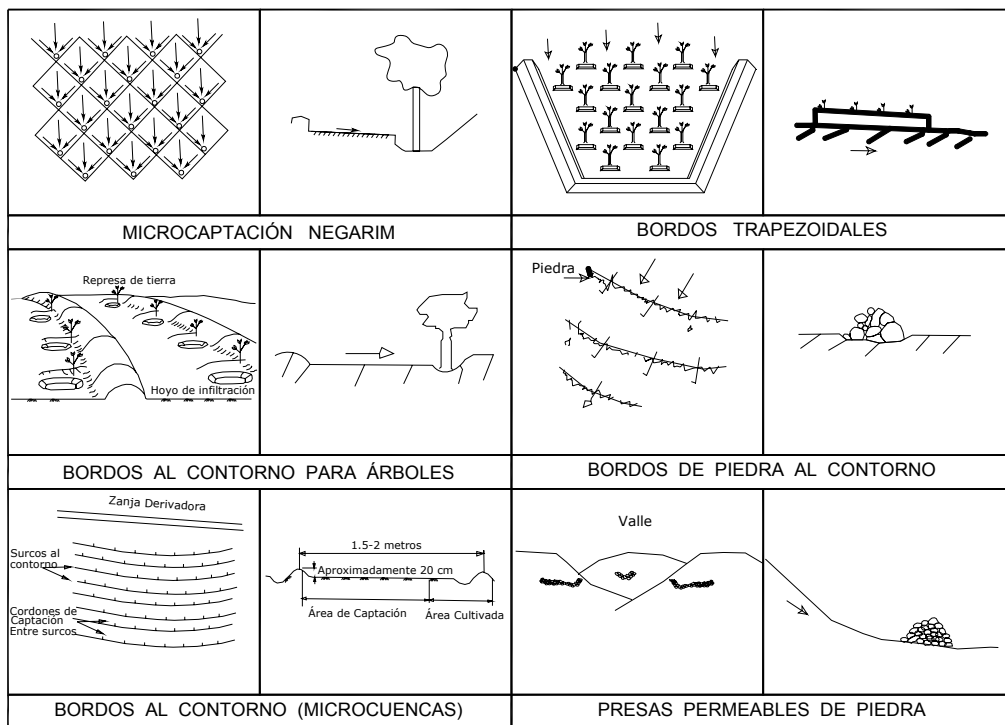


Figura 2. Principales técnicas de captación de Agua de Lluvia.

2.3. INVESTIGACIONES REALIZADAS EN CAPTACION DE AGUA DE LLUVIA

Núñez (1982) al evaluar el efecto de las microcuencas de captación de lluvia, la adición de cobertura de rastrojo y la incorporación de estiércol, sobre la cantidad de escurrimientos, régimen de humedad del suelo, consumo de agua del cultivo, características fenológicas y producción de grano y forraje de cebada. Encontró

que los rendimientos de grano y forraje seco se incrementaron significativamente con el uso de microcuencas, asimismo la cobertura de rastrojo aumentó en forma significativa el rendimiento de grano y forraje, señala que con la adición de 5 a 10 ton de cobertura ha^{-1} se alcanzaron beneficios económicos para el agricultor, haciendo rentable su aplicación.

En otra investigación llevada a cabo por Duarte (1985) en Tecámac, Estado de México, en donde se incluye la colocación de microcuencas entre los tres métodos de siembra probados (plano, surco y microcuenca). La variable de estudio fue la cantidad y elongación de raíces del cultivo de maíz. Los resultados mostraron que no hubo variación para los tratamientos estudiados, aun que tuvo la tendencia de que a medida que aumenta la separación de hileras se aumenta el número de longitud promedio de las raíces mayores a 1 mm de diámetro; asimismo, la siembra en plano produjo menor número y longitud de raíces en un 9.6 y 11.5 %, respectivamente.

Martínez *et al.* (1986) al estudiar cuatro tipos de microcuencas para captación de lluvia *in situ*. Las microcuencas que comparó fueron cuadro – surcado, bacheo, microrrepresa y microcuenca tradicional. Observó que la obra más eficiente en relación a la producción de materia seca y verde fue la micropresa, además señala que aquellas obras donde se excavó (bacheo y microrrepresa) almacenaron y retuvieron más humedad que las otras dos, finalmente menciona que la obra más eficiente para captar humedad es la microrrepresa.

Por otra parte en una investigación realizada por Alvarado y Mondragón (1987), en donde probaron diferentes anchos de microcuencas de captación, cobertura de plástico y paja y distancia entre plantas, comparado con un testigo. Observaron que para cualquier ancho de microcuenca la paja fue efectiva para conservar la humedad cuando la precipitación fue superior a 10 mm y el plástico fue efectivo cuando hubo menos de 10 mm, apreciaron que el crecimiento de la planta disminuyó al disminuir el tamaño de microcuenca.

En un trabajo realizado por Osorio (1989), al estudiar el efecto de los factores: Tamaño de microcuenca, volumen de agua estimado por planta y cobertura de paja de cebada. Indicó que para cada volumen de agua por planta existe un tamaño de microcuenca específico que maximiza el rendimiento de grano y hace más eficiente el uso de agua de lluvia. En dicho estudio señala que el tratamiento óptimo económico para altos riesgos y/o restricciones de capital se obtienen con un tamaño de microcuenca de 1.45 m y un arreglo de plantas que permita captar 22 L de agua por planta tanto para la producción de grano y forraje, como para la producción única de grano.

Anaya (1990) al realizar un estudio comparativo de tamaño de microcuenca, encontró que a mayor tamaño de microcuenca, se incrementa el rendimiento en la mayoría de las situaciones; así, una superficie por planta de 0.2432 m² incrementó su rendimiento en 18 y 250 kg ha⁻¹ con un tamaño de microcuenca de 1.14 y 1.90 m, respectivamente, en relación a microcuencas de 0.76 m, lo cual señala que a mayor superficie por planta dedicada al área de escurrimiento de las microcuencas sí proporcionan mayor volumen de agua por planta, incrementando los rendimientos de grano, tanto por planta, como por hectárea.

Mora y Tovar (1990) en un trabajo con diferentes tamaños de microcuencas, distancia entre contras y densidades de población, utilizando maíz en temporal encontró que el tamaño de microcuenca de 1.40 m presentó los mayores rendimientos de grano por hectárea y con un surcado normal. El conteo a 2.50 m contribuyó de manera positiva a incrementar los rendimientos en la microcuenca de 1.40 m.

Osorio y Tovar (1990) al realizar una investigación con diferentes tamaños de microcuenca (0.85, 1.10, 1.45 y 1.90 m), volumen de agua a captar por planta (50, 125 y 200 L) y cobertura de paja de cebada en el área de siembra (0, 25 y 0.5 kg m²) con relación al peso de las raíces de maíz, encontraron que los mayores pesos de raíces se encontraron en la microcuenca con 1.90 m en donde se

presentó mayor humedad. En cuanto a la distribución radical en función de la profundidad y los factores de estudio, se obtuvo que la densidad de raíces fue mayor en la microcuenca de 1.90 m principalmente en los 15 cm de profundidad; fue mayor en el nivel superior de volumen de agua captado por planta y bajo los niveles de cobertura, con 0.5 kg m^{-2} la raíz tendió a acumularse en los primeros 15 cm de profundidad y a disminuir con la profundidad en contraste al suelo desnudo.

En un experimento llevado a cabo por López y Salazar (1998) con dos genotipos de maíz (B-15 y H-419) y utilizando como medio para proveer agua al cultivo un sistema de captación de agua de terrazas de 100 m de largo, 1 m de ancho y 1 m de altura y con 30 m de separación entre una terraza y otra. De acuerdo a lo anterior el genotipo que obtuvo mayores rendimientos fue el genotipo H-419 con 22 ton ha^{-1} versus 17 ton ha^{-1} de B-15.

2.4. CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN DE LITERATURA

El maíz es considerado como el cultivo agrícola más importante de México, desde el punto de vista alimentario industrial, político y social, (SAGARPA, 2007). Ya que del total utilizado en el país, 59 por ciento se consume en tortillas, el 36 por ciento se destina a otros usos (animal y semillas) y el 5 por ciento es procesado por la industria almidonera.

Además, se calcula que el consumo per cápita es de 300 g día^{-1} , con lo cual aporta el 56 por ciento de las calorías y el 47 por ciento de las proteínas de la alimentación del mexicano. En áreas rurales, estos porcentajes son 70 y 56 por ciento, respectivamente, de acuerdo con González (1995).

Su rendimiento depende de muchos factores, como son fertilidad, variedad, tipo de suelo, temperaturas del medio, uso de tecnología, etc., (Llanos, 1984). Y, cabe señalar que dicho cultivo se considera más eficiente que la mayoría en lo que respecta al aprovechamiento de la humedad, dado que requiere 370 partes de

agua para producir una parte de materia seca (grano y rastrojo); lo cual indica que las necesidades de agua del cultivo en condiciones óptimas es de 800 a 1200 mm, durante su ciclo vegetativo (CDIA, 1980; Doorenbos y Kassam, 1986). No obstante, con 150 mm de precipitación pueden esperarse cosechas de grano (Llanos, 1984).

La captación del agua de lluvia *in situ* puede considerarse como una buena alternativa para la producción de maíz sembrado bajo condiciones de temporal, cuya superficie constituye el 85.5% del total nacional destinada a dicho cultivo (SAGARPA, 2007), puesto que reduce los riesgos de sequía al aumentar el agua disponible para las plantas (INIFAP, 2002), permitiendo además, incrementar los rendimientos del cultivo de maíz de temporal hasta en un 30 por ciento (Gallegos, 2004).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de tres tipos de captación de agua de lluvia *in situ*, en el contenido de humedad del suelo y la producción de maíz respecto al método de siembra tradicional, para las condiciones ambientales del lugar.

3.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar el tipo de captación del agua de lluvia más eficiente en la producción de grano y materia seca del cultivo de maíz considerando el tipo de suelo, clima y prácticas de construcción de las microcuencas.
- Estudiar y evaluar el comportamiento de la humedad aprovechable del suelo bajo las cuatro condiciones: arada parcial con contras, surcos inclinados (tipo Anaya) con contras, surcado tradicional con contras y surcado tradicional.
- Calcular el porcentaje de luz interceptada mediante la toma de datos de radiación fotosintéticamente activa y determinar si existen diferencias significativas entre tratamientos.
- Hacer el análisis de los factores fisiotécnicos; altura de plantas, número de hojas y diámetro del tallo de las plantas de maíz, bajo las 3 condiciones a probar en comparación con el testigo.
- Dar una explicación de los rendimientos obtenidos en cada tratamiento, haciendo uso de la metodología propuesta por la FAO (2000), para el pronóstico de rendimientos.

4. HIPÓTESIS

Con el propósito de cumplir con los objetivos del presente trabajo de investigación se plantean las siguientes hipótesis:

El uso de los métodos de captación de agua de lluvia *in situ*, afectan de manera significativa:

- La cantidad de humedad aprovechable en la zona radical.
- El rendimiento de grano y materia seca del cultivo de maíz.
- El porcentaje de luz interceptada por las plantas de maíz, al incrementar la expansión del dosel.
- Las variables fisiotécnicas; altura de plantas, número de hojas y diámetro del tallo.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5. 1. CARACTERÍSTICAS DEL SITIO EXPERIMENTAL

5.1.1. Ubicación Geográfica

El trabajo de investigación se realizó en los meses de Junio a Noviembre de 2006, en el lote experimental identificado con la clave 6F, adyacente a la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados en Montecillo, Edo. de México (Figura 3), ubicado a una altitud de 2240 msnm; latitud norte de 19° 21' y longitud oeste de GW 98° 54'.

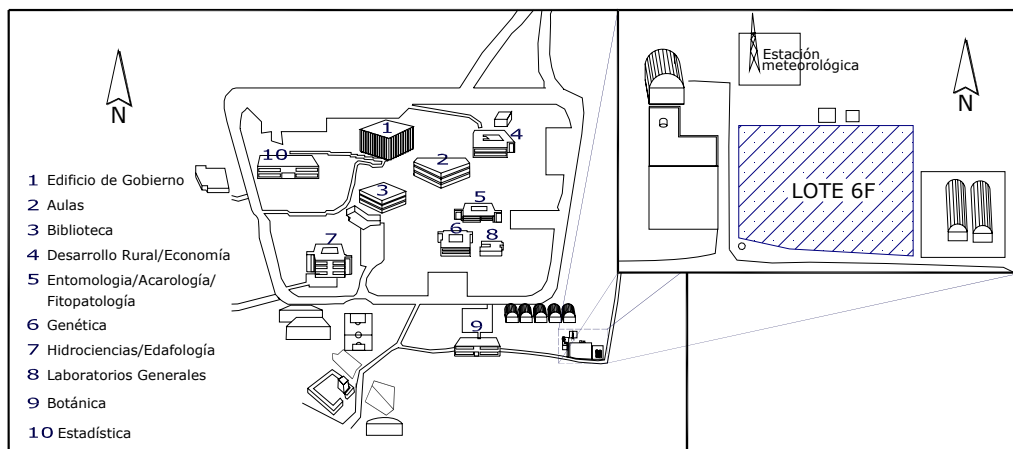


Figura 3. Localización del sitio experimental dentro del campus Montecillo del Colegio de Postgraduados.

5.1.2. Clima

El clima del sitio experimental, de acuerdo a la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García (1988) es:

C (W_o) (W) b (i')

C W(o). Clima templado subhúmedo con lluvias en verano cuya relación entre la precipitación anual y la temperatura media anual presenta un cociente P/T menor a 43.2.

(W). Precipitación en el mes más seco menor a 40 mm. Por lo menos 10 veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad caliente del año que en el mes más seco.

B (i'). Templado con verano fresco largo, con temperatura media del mes más frío entre -3 y 18° C, temperatura media del mes más caliente entre 6.5 y 22° C y una oscilación térmica anual entre 5 y 7° C.

La precipitación y la temperatura media anual son 625 mm y 16° C, respectivamente.

5.1.3. Suelos

5.1.3.1. Características Físicas.

Para los fines de este trabajo de investigación se determinaron algunas propiedades físicas del suelo en el laboratorio perteneciente al área de Hidrociencias en el Colegio de Postgraduados, considerando un total de 12 muestras (producto de una mezcla de 24 muestreos realizados en campo), dichas muestras corresponden a 3 estratos cuyo espesor fue de 20 cm para cada uno, en los 4 bloques establecidos en el Diseño experimental (ver apartado 5.2), los resultados se presentan en el cuadro 1.

De acuerdo con los resultados que se presentan en el cuadro 1, puede decirse que en general, se trata de un suelo franco-arenoso con densidad aparente promedio de 1.32 (g cm^{-3}). En cuanto a los valores medios del porcentaje de humedad a CC y PMP para las 3 profundidades consideradas, éstos se presentan en el cuadro 2.

Otra de las propiedades físicas que se determinó fue la velocidad de infiltración del suelo por el método del infiltrómetro de doble cilindro que consiste en instalar en el terreno un juego de dos cilindros de acero, huecos en el centro, de 40 cm de alto, de 30 y 45 cm de diámetro, respectivamente. Se coloca una placa de acero sobre los cilindros manteniéndolos a nivel. Luego se golpea la placa hasta que los

cilindros penetren de 10 a 15 cm dentro del suelo, (Aguilera y Martínez, 1996). Se llena de agua la parte comprendida entre los dos cilindros y posteriormente se llena de agua el cilindro interior que fue previamente cubierto con plástico, se toma la lectura del tirante antes de quitarlo. Las lecturas se hacen para diferentes intervalos de tiempo. Para la obtención de la velocidad de infiltración se utilizó la ecuación de Kostiakov-Lewis, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$I = KT^{-n}$$

Donde:

I = Velocidad de infiltración, cm h⁻¹.

K = Parámetro que representa la velocidad de infiltración durante el intervalo inicial (cuando t = 1min).

T = Tiempo, min.

n = Parámetro que indica la forma en que la velocidad de infiltración se reduce con el tiempo, -1.0 < n < 0.

Integrando la ecuación anterior se obtiene la infiltración acumulada (Z).

Cuadro 1. Valores de las propiedades físicas del suelo determinadas al sitio experimental, por profundidad por bloque.

Bloque	Prof.	¹ Textura			Clasificación	² Da (g/ cm ³)	³ % Humedad a CC (0.3 Atm)	³ % Humedad a PMP (15 Atm)
		% de arcilla	% de limo	% de arena				
Bloque I	0-20	20.52	24.52	54.96	Franco arcillo arenoso	1.31	17.53	10.65
	20-40	18.88	20.16	60.96	Franco arenoso	1.32	16.91	10.48
	40-60	18.88	20.16	60.96	Franco arenoso	1.31	15.96	9.927
Bloque II	0-20	18.52	25.52	55.96	Franco arenoso	1.33	18.22	11.41
	20-40	18.88	25.16	55.96	Franco arenoso	1.31	15.90	10.35
	40-60	18.88	28.16	52.96	Franco arenoso	1.32	16.27	10.54
Bloque III	0-20	14.52	27.52	57.96	Franco arenoso	1.33	17.75	10.51
	20-40	20.88	24.16	54.96	Franco arcillo arenoso	1.31	18.23	11.19
	40-60	20.88	24.16	54.96	Franco arcillo arenoso	1.31	20.11	13.50
Bloque IV	0-20	16.52	20.52	62.96	Franco arenoso	1.31	17.66	10.66
	20-40	20.52	23.24	56.24	Franco arcillo arenoso	1.31	17.20	10.96
	40-60	18.88	29.6	51.52	Franco arenoso	1.33	18.63	11.85

Método utilizado: ¹Hidrómetro de Bouyoucos; ² Método del petróleo; ³Gravimétrico, mediante la olla y membrana de presión.

Cuadro 2. Valores medios del porcentaje de humedad a CC y PMP.

Prof.	% Humedad a CC (0.3 Atm)	% Humedad a PMP (15 Atm)
0-20	17.53	10.65
20-40	16.91	10.48
40-60	18.63	11.85

5.1.3.2. Características Químicas.

La determinación de las propiedades químicas mostradas en el cuadro 3, al igual que las propiedades físicas fueron determinadas en el Laboratorio de prácticas perteneciente al área de Hidrociencias en el Colegio de Postgraduados.

Cuadro 3. Propiedades químicas de los suelos determinadas al sitio experimental.

Bloque	Prof.	¹ pH	² CE (mmhos/cm a 25°C)	³ %MO	⁴ PO _{sat} (atm)
Bloque I	0-20	6.86	13.967	1.61	5.028
	20-40	4.08	6.651	1.49	2.394
	40-60	4.37	6.429	0.99	2.314
Bloque II	0-20	7.16	8.203	1.37	2.953
	20-40	7.23	7.760	1.99	2.794
	40-60	7.71	5.210	0.99	1.876
Bloque III	0-20	7.07	13.635	1.49	4.909
	20-40	7.44	8.979	1.55	3.232
	40-60	8.02	6.762	1.18	2.434
Bloque IV	0-20	7.30	12.083	1.61	4.350
	20-40	7.55	9.422	1.24	3.392
	40-60	8.11	7.205	0.75	2.594

Método utilizado: ¹Potensiométrico, relación suelo agua 1:2; ²Puente de conductividad en el extracto de la pasta; ³Walkey y Black; ⁴PO = (CE x 10³)x0.36, Aguilera y Martínez (1996).

5.1.3.3. Determinación de las curvas de tensión y esfuerzo de humedad del suelo.

Las curvas de tensión y esfuerzo de humedad del suelo (THS y EHS), se determinaron para las 3 profundidades consideradas (0-20, 20-30 y 30-40 cm).

Para la obtención de la curva de THS se utilizó la ecuación de tipo exponencial propuesta por Palacios (1963) citada por Aguilera y Martínez (1996). Este método consiste en obtener datos de humedad a diferentes tensiones, siendo CC y PMP los únicos valores conocidos, en este caso, dichos valores se presentan en el cuadro A2 y las curvas en la figura A1, del apartado de anexos.

$$T = \frac{K}{(Ps)^n} + C$$

Donde:

T = Tensión del suelo, atm.

Ps = Porcentaje de humedad, %.

n = Exponente que depende de las características físicas del suelo, adimensional.

K = Constante que depende de la textura, estructura y compactación del suelo, adimensional.

C = Constante que también es función de las características físicas del suelo, adimensional.

$$C = 0.000014 (CC)^{2.7} + 0.3$$

En el caso de la curva de EHS, ésta es el resultado de la suma de las fuerzas de tensión más la presión osmótica, Aguilera (1996).

$$EHS = T + PO$$

Donde:

EHS = Esfuerzo de Humedad del suelo, atm.

T = Tensión, atm.

PO = Presión osmótica, atm.

5.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se utilizó un diseño experimental de Bloques completos con tratamientos aleatorizados con igual número de submuestras. La técnica del submuestreo se utilizó en este caso para aumentar la precisión del experimento y consistió en

tomar dos observaciones por unidad experimental, Alvarado (1996), el modelo lineal correspondiente es:

$$Y_{ikj} = \mu + B_i + \tau_K + \delta_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ikj} = j-ésima observación del tratamiento k perteneciente al bloque i, $i = 1, 2, 3$ y 4
 $k = A, B, C$ y D , $j = 1$ y 2 .

μ = efecto de la media

B_i = efecto del bloque i

τ_K = efecto del tratamiento k

δ_{ik} =interacción del bloque i y el tratamiento k

ε_{ikj} = error muestral

La decisión de utilizar el diseño experimental de Bloques completos con tratamientos aleatorizados se tomó debido a que en los meses anteriores (Marzo a Mayo de 2006) se sembró cebada en aproximadamente la mitad de la superficie del terreno utilizado en el experimento, por lo cual se asume que las propiedades del suelo fueron alteradas en esa porción. Los bloques quedaron como se observa en la figura 4.

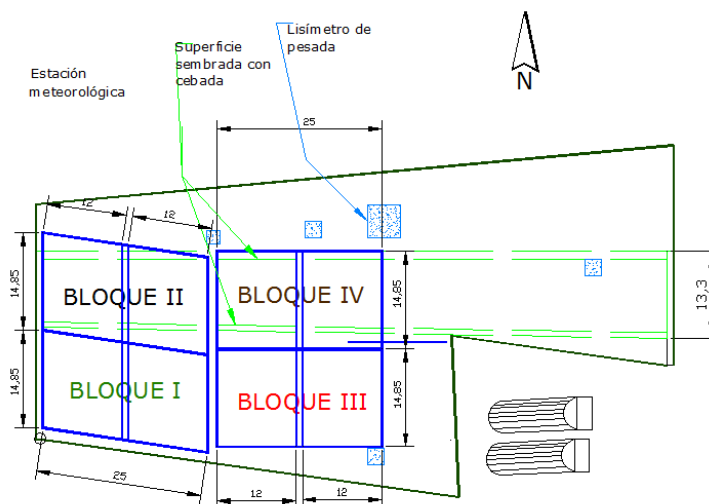


Figura 4. Disposición de los bloques en el sitio experimental.

5.3. ESTABLECIMIENTO Y CONDUCCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.

5.3.1. Preparación del terreno

La preparación del terreno se llevó a cabo en el mes de febrero, el cual consistió en un barbecho a una profundidad aproximada de 15 cm, y una nivelación de la superficie total del terreno. Cabe señalar que debido a la siembra de cebada en una porción de la superficie total (mostrada en la Figura 4), éste fue nuevamente barbechado y reacomodado en esa parte, para su posterior surcado.

5.3.2. Establecimiento del experimento

La elaboración de los surcos se realizó el día 31 de mayo, y la forma correspondiente a cada tratamiento el día 1º de junio, siendo los tratamientos los siguientes:

- Tratamiento A; Arada parcial con contras a cada 3 m,
- Tratamiento B; Tipo Anaya (Surco inclinado) con contras a cada 3 m,
- Tratamiento C; Surcado normal con contras a cada 3 m y,
- Tratamiento D (Testigo); Surcado tradicional sin contras.

La forma particular de los tratamientos A y B (Arada parcial y Surcos tipo Anaya) se hicieron de forma manual, mediante el uso de pala, con la ayuda de personal del área de campo del Colegio de Postgraduados. Todos los tratamientos se distribuyeron de manera aleatoria 2 veces en cada bloque con la finalidad de obtener dos observaciones por tratamiento por bloque (submuestreo), con un total de 8 surcos por tratamiento por bloque. La distancia entre surcos fue de 90 cm, tal y como se muestra en las figuras 5 y 6.

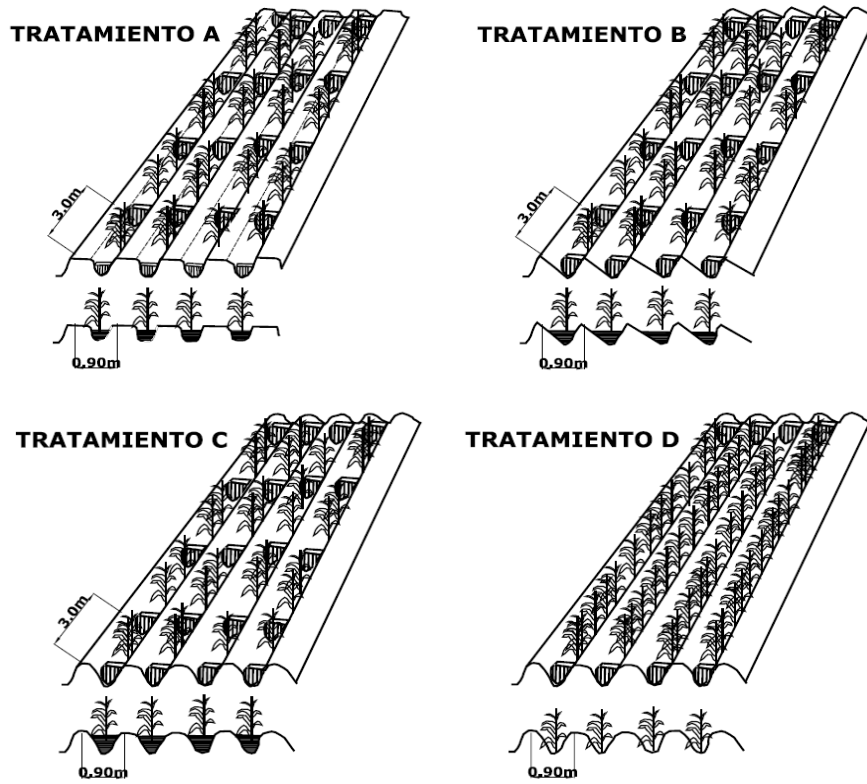


Figura 5. Tratamientos de los que constó el experimento.

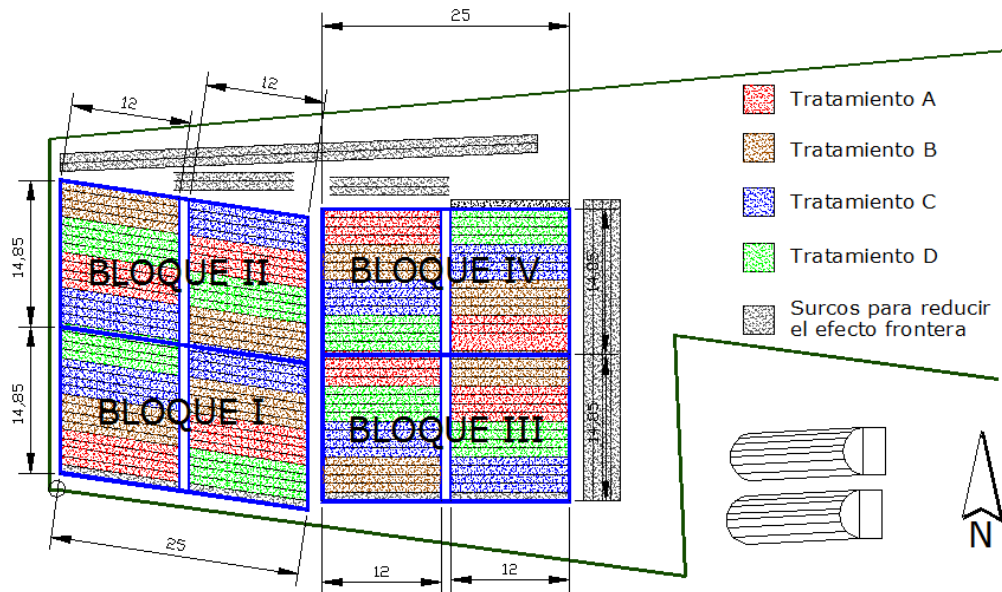


Figura 6. Distribución de los tratamientos en cada bloque del sitio experimental.

5.3.3. Siembra

La siembra se llevó a cabo el día 2 de Junio de 2006, a una distancia entre matas de 40 cm. La variedad de semilla sembrada fue “San Josecito”, que es un híbrido desarrollado en la Universidad Autónoma Chapingo, el cual, de acuerdo con el proveedor, es recomendable tanto para riego como para temporal, apta para la producción de elote, forraje ó grano, con 78 días a floración registrados y un rendimiento de grano que va de 4 a 8 ton/ha, (UACH, 2004).

5.3.4. Aclareo

Al momento de la siembra se colocaron 3 semillas mata⁻¹, para 15 días después desahijar (18 de junio), dejando solo 2 plantas mata⁻¹, con una distancia entre matas de 40 cm. La densidad de población fue de 55, 500 plantas hectárea⁻¹ para todos los tratamientos.

5.3.5. Fertilización

No se realizó aplicación de fertilizante previa ni posterior al establecimiento del experimento en campo. De modo que los rendimientos obtenidos estuvieron en función de la disponibilidad de nutrientes presentes en el suelo, las condiciones climatológicas dadas en la región y las aportaciones de lluvia ocurridas a lo largo del ciclo del cultivo, éstas últimas se presume que impactarán de manera diferente en los rendimientos, dada la conformación de las microcuencas.

5.3.6. Control de malezas, plagas y enfermedades.

Malezas. Uno de los problemas graves que se presenta al establecer un cultivo desde que se siembra hasta que se cosecha es la invasión constante de malezas o malas hierbas causando pérdidas debido a la competencia por nutrimentos, agua, luz y espacios en el suelo, (Landeros, 2000), es por ello que se contó con una persona que realizó deshierbes manuales con azadón para eliminar la maleza de manera continua (3 días a la semana) a lo largo de todo el ciclo del cultivo,

cuidando de mantener la forma de los tratamientos. El día 7 de agosto, durante la etapa vegetativa del cultivo, dado que la maleza rebasaba el avance del deshierbe, nuevamente el personal de campo apoyó limpiando el total de la superficie del experimento.

Plagas. En la etapa del establecimiento (del 2 al 15 de Junio), se presentaron problemas de roedores en la periferia del experimento, los cuales se comían la semilla, esto se controló con veneno de uso doméstico colocado en sus madrigueras y virtiendo semilla alrededor del experimento con la finalidad de que al estar más disponible la prefirieran mientras germinaba la que estaba dentro, asumiendo también que la semilla tratada surtiría un efecto similar al del veneno.

Enfermedades. En algunas plantas se presentó roya común producida por el hongo *Puccinia sorghi*, que son pústulas de color marrón que aparecen en el envés y haz de las hojas (CIMMYT, 2004), puesto que su daño no fue significativo, no se combatió con productos químicos.



Figura 7. Hoja de maíz afectada por roya común (*Puccinia sorghi*), (CIMMYT, 2004).

5.4. REGISTRO DE LAS OBSERVACIONES REALIZADAS

Los datos de interés registrados fueron: Precipitación pluvial, humedad del suelo, radiación fotosintéticamente activa, rendimiento de grano, materia seca total y su partición (al final) y, altura, diámetro y número de hojas de las plantas.

5.4.1 Precipitación pluvial

La precipitación pluvial fue cuantificada con el pluviómetro perteneciente a la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados, adyacente al sitio experimental, los valores diarios registrados se presentan graficados por etapa fenológica en el apartado de resultados.

5.4.2. Humedad del suelo

La humedad del suelo se determinó de manera indirecta a partir de los valores de pulsaciones registradas por el sensor de humedad TDR de Campbell Sci., modelo CR500, que consta de 2 varillas (sensor), las cuales se introdujeron a 2 profundidades (0-15 y 15-30 cm), para posteriormente enviar una señal al receptor que traduce dichas pulsaciones en un valor numérico adimensional. Para obtener la curva de calibración correspondiente, mediante el método gravimétrico se determinó la humedad del suelo bajo diferentes condiciones de humedad en el sitio experimental durante varios días en el mes de mayo (yendo de suelo seco hasta suelo prácticamente saturado), estos valores se correlacionaron con los datos registrados con el sensor tomados en el lugar y momento justo donde se realizaron los muestreos para su determinación de humedad, los resultados se presentan en la Figura 8.

La ecuación presentada en la figura 8 fue la que se utilizó para transformar los valores adimensionales, registrados con el sensor de humedad, cada tercer día desde la siembra hasta la emergencia del cultivo de maíz en contenido de humedad gravimétrico para su posterior análisis.

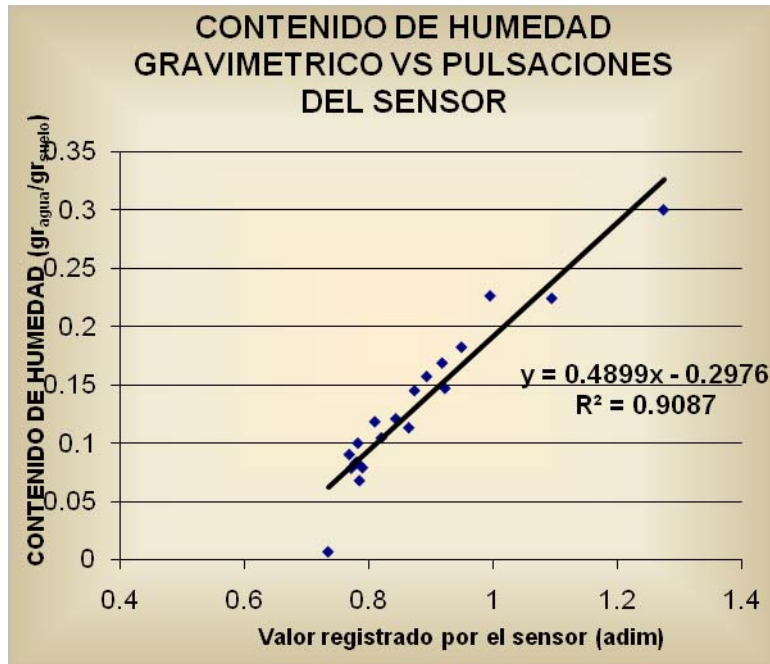


Figura 8. Obtención de la ecuación que relaciona el valor registrado por el sensor de humedad modelo CR500 con el contenido de humedad gravimétrico.

5.4.3. Radiación Fotosintéticamente Activa

La toma de datos de Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) se realizó con la ayuda un radiómetro de la marca LI COR, modelo LI-1856, cada 8 días desde el 3 de Julio hasta el 14 de septiembre de 2006.

Con los valores obtenidos con dicho aparato se calculó el porcentaje de luz interceptada en cada tratamiento:

$$\%LI = \frac{Q}{Q_0} \times 100$$

Donde:

%LI = Porcentaje de luz interceptada, adim.

Q_0 = Flujo fotónico medido sobre el dosel, Wm^{-2} .

Q = Flujo fotónico medido bajo el dosel, Wm^{-2} .

Las mediciones se realizaron colocando el sensor de manera transversal a la dirección de los surcos, sobre el dosel y en la parte basal del las plantas.

5.4.4. Rendimiento de grano

La cosecha del maíz para determinar el rendimiento de grano se realizó el día 26 de noviembre, y consistió en pizcar las mazorcas de la parcela útil (60 plantas de los 2 surcos centrales de 12 m de largo, dejando 3 m en cada lado como orilla), cortando a su vez las plantas correspondientes para amogotarlas y así acelerar su secado, tal y como se muestra en la figura 9.

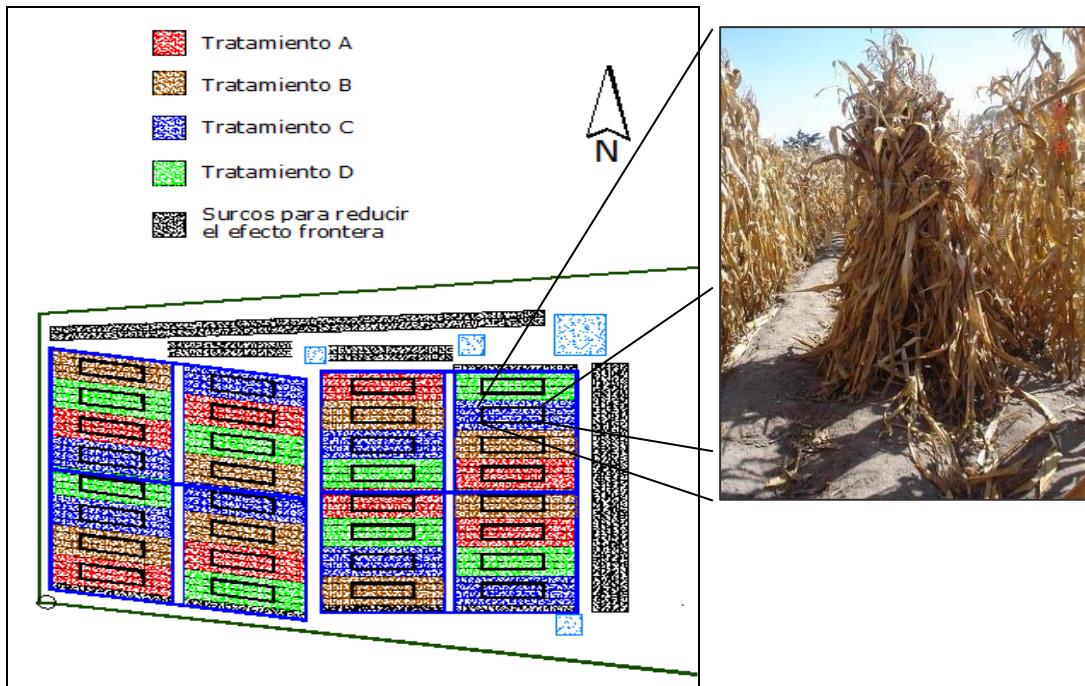


Figura 9. Ubicación de la “parcela útil” por tratamiento por bloque en el sitio experimental, utilizada en la obtención del rendimiento de grano.

La mazorca recolectada se colocó en bolsas etiquetadas para diferenciar la correspondiente a cada tratamiento y durante los días posteriores se expuso al sol. El día 3 de enero se desgranó y determinó el contenido de humedad del grano mediante la toma de 2 muestras por bloque (8 en total), resultando un promedio de 8.07% de contenido de humedad.

5.4.5. Materia seca total y su partición

En el experimento se obtuvieron 2 valores de materia seca total, el primero fue resultado de la suma del peso de las 60 plantas amogotadas y secadas al aire

libre más el peso del olote (pesado al momento de desgranar para obtener el rendimiento de grano) y, el segundo de las plantas etiquetadas por tratamiento (Ver apartado 4.4.6.).

En lo que respecta a la partición de materia seca, ésta se obtuvo sólo para las plantas etiquetadas considerándose los siguientes factores:

- Tallo
- Hoja
- Espiga
- Olote
- Brácteas (Totomoxtle)
- Grano

5.4.6. Altura, diámetro y número de hojas.

Para la obtención de los datos de altura, diámetro y número de hojas, se etiquetaron 6 plantas por tratamiento por bloque (Figura 10), y se comenzó a registrar su información a partir del día 16 de junio hasta el 22 de septiembre.

- **Altura.** Se registró de manera periódica (cada ocho días), auxiliándose para ello de un estadal graduado en cm; se midió desde la base de las plantas a la excursión de la hoja más joven. La medición se efectuó en las plantas etiquetadas y se obtuvo su media aritmética.
- **Diámetro del tallo.** Asumiendo que la forma de las microcuencas afecta el grosor del tallo, se hicieron las mediciones de dicha variable en la parte basal, haciendo uso de un vernier. Esta variable se comenzó a medir 8 días después de la altura y número de hojas en las plantas etiquetadas, para evitar maltratarlas. Se calculó su media.

- **Número de hojas.** Al igual que la altura y el diámetro del tallo, el número de hojas se contó y registró cada 8 días en las plantas etiquetadas y se calculó su media aritmética.

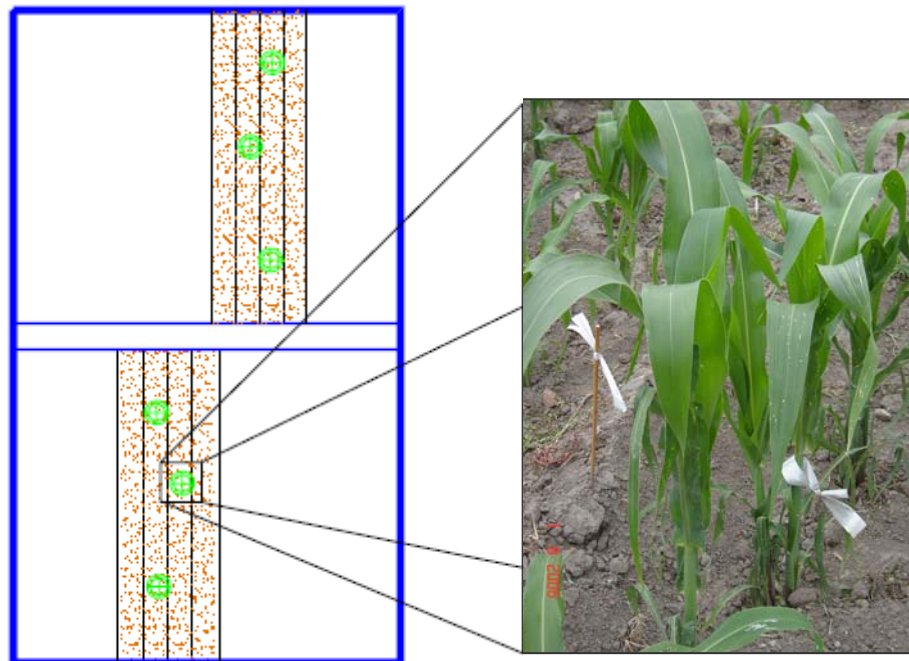


Figura 10. Plantas etiquetadas por bloque utilizadas en la obtención de los datos de altura, diámetro y número de hojas.

5.5. OTRAS OBSERVACIONES

5.5.1. Determinación del coeficiente de absorción foliar

La fotosíntesis de un cultivo no sólo depende de la distribución de Q (flujo fotónico que activa la fotosíntesis; esto es fotones en la longitud de onda de 400 a 700 nm) entre los estratos, sino también de la cantidad total de Q absorbida por el dosel. A medida que se desciende en el dosel, Q disminuye mas o menos exponencialmente con la cantidad de material foliar encontrado. Además, si los tallos absorben cantidades significativas de Q , también deben tomarse en cuenta (Coombs et al., 1988). De este modo, dichos autores proponen una ecuación en la que se considera **un índice de absorción foliar (K)** que representa la fracción

de fotones incidentes absorbidos por área unitaria, esta ecuación considera los aspectos antes mencionados:

$$kF = \ln\left(\frac{Q_0}{Q_F}\right)$$

Donde:

K = Coeficiente de absorción foliar, adimensional.

F = Índice de área foliar acumulativo, m² de área foliar/ m² de superficie del terreno.

Q₀ = Flujo fotónico horizontalmente arriba de la cima del dosel, nm.

Q_F = Flujo fotónico en cualquier nivel F dentro del dosel, nm.

Para determinar el valor del coeficiente de absorción foliar (K), correspondiente a cada tratamiento del presente experimento, se utilizó un cuadrado hecho de alambre que cubrió una superficie de 1 m², éste sirvió de guía para identificar las plantas y hojas que quedaran dentro del mismo. Mediante el uso del radiómetro de la marca LI COR, modelo LI-L856, y con la ayuda de una escalera y un estadal se midió la radiación incidente sobre la cima del dosel (Q₀) y los valores de Q_F a cada 20 cm, desde la punta de la espiga hasta la base de las plantas, colocado en dirección de un vértice al opuesto del cuadrado de alambre. Una vez registrados los valores de radiación, se procedió a cortar hojas y tallos de las plantas que quedaban visiblemente dentro del cuadrado de alambre a la misma altura a la que se registraba la radiación, cada 20 cm, para posteriormente determinar el área de las hojas mediante el uso del integrador de área foliar de la marca LI COR, modelo LI-3100 y, de los tallos con la fórmula del área del rectángulo b x h (base x altura), donde la base es; $\pi \times \phi$ (3.1416 x diámetro del tallo) y la altura se midió directamente del tallo.

Los valores obtenidos del área foliar correspondiente a cada estrato de 20 cm, solo se transformaron de cm² a m² para obtener los índices de área foliar (IAF), dado que IAF= área foliar m²/superficie del terreno m² y, en este caso, la superficie considerada fue de 1m². Se calcularon los valores de F (IAF_{acumulado}) y se

graficaron contra los del Ln (Q_0/Q_F), para finalmente aplicar regresión lineal y obtener la ecuación que proporcionaría el valor de K. Todo el procedimiento descrito anteriormente, se realizó una vez por cada tratamiento en la misma fecha, 2 de Octubre de 2006.

5.5.2. Explicación de los rendimientos obtenidos utilizando la metodología propuesta por la FAO (2000).

En el presente apartado se pretende dar una explicación a los rendimientos de grano obtenidos para cada tratamiento al final del trabajo de investigación, haciendo uso de la metodología propuesta por la FAO (2000), para el pronóstico de rendimientos de diferentes cultivos agrícolas, dicha metodología involucra la siguiente fórmula:

$$Y = Y_{m\acute{a}x} * F * K_{hidr} * K_{sal}$$

Donde:

$Y_{m\acute{a}x}$ = Rendimiento potencial máximo o agroclimático económicamente aprovechable que puede producir cultivo sano con un suministro adecuado de nutrimentos y agua, en ha^{-1} .

F = Factor de restricción del rendimiento por deficiencia de nutrición (Índice integral de Fertilidad), adimensional (varía entre 0 y 1).

K_{hidr} = Factor de restricción del rendimiento por deficiencia de suministro de agua, adimensional (varía entre 0 y 1).

K_{sal} = Factor de restricción del rendimiento por salinidad del suelo, adimensional (entre 0 y 1).

Valor de Y

Dado que no se requiere de estimar los rendimientos, puesto que se dispone de los valores de rendimiento real por tratamiento por bloque, éstos se sustituirán en la ecuación en el espacio destinado para la variable Y (Rendimientos estimados en $ton\ ha^{-1}$).

Valor de $Y_{m\acute{a}x}$.

El rendimiento máximo ($Y_{m\acute{a}x}$) considerado en el presente proyecto de investigaci3n, corresponde al reportado por el proveedor de la semilla utilizada, variedad San Josecito, el cual es igual a 8 ton ha^{-1} , (Chapingo, 2004).

Cálculo de K_{hidr}

Para el cálculo del factor K_{hidr} se utiliza la siguiente f3rmula (Sys, Van Ranst y Debaveye, 1991):

$$K_{hidr} = f \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\theta_{media_i} - PMP)}{(\theta_{optima_i} - PMP)} \right]$$

Donde

$$f = \text{Una funci3n de la suma } \sum_{i=1}^n \frac{(\theta_{media_i} - PMP)}{(\theta_{optima_i} - PMP)};$$

θ_{media_i} = Es la humedad media del suelo en la zona radical del cultivo durante el mes con número i en el ciclo de desarrollo del cultivo.

PMP = Es la humedad correspondiente al Punto de Marchitez Permanente.

θ_{optima_i} = Es la humedad 3ptima del suelo en la zona radical del cultivo durante el mismo mes con número i .

$\sum_{i=1}^n$ = Es la suma de las fracciones $\frac{\theta_{media_i} - PMP}{\theta_{optima_i} - PMP}$ en cada mes durante el ciclo de

desarrollo del cultivo con duraci3n total de n meses; la fracci3n $\frac{\theta_{media_i} - PMP}{\theta_{optima_i} - PMP}$ se

calcula consecutivamente para el mes primero $i = 1$, segundo $i = 2$, etc. hasta el último mes con número n .

Existen varios modelos matemáticos, los cuales se describen la forma de la funci3n f (Taylor, 1987; FAO, 2000; etc.).

Para las condiciones del experimento se calculó un valor de θ_{optima} para cada etapa fenológica en base a la evapotranspiración potencial calculada específicamente para este ciclo del cultivo de maíz (Cuadro A18). Y, dado que se dispone de la información de contenido de humedad en el suelo a cada tercer día del ciclo del cultivo, así como del contenido de humedad a PMP (10.48%), se calcularon valores de K_{hidr} a cada tercer día y, posteriormente, los promedios correspondientes a cada etapa fenológica, agrupados de dos en dos (Bloques I-III, y bloques II-IV), los cuales se presentan en los Cuadros A19 y A20.

$$K_j = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{media_i} - PMP)}{n (\theta_{optima_i} - PMP)}$$

$K_j = K_{hidr}$ correspondiente a la etapa fenológica j ,

siendo $j = 1$ (Etapa de establecimiento), 2 (Etapa vegetativa), 3 (Etapa de floración), 4 (Etapa de formación del elote y llenado del grano), y 5 (Etapa de madurez); $i =$ Día de registro de humedad; $n =$ Número total de días de los que constó la etapa fenológica j .

θ_{media} = Humedad media del suelo correspondiente al día i .

θ_{optima} = Humedad óptima del suelo calculada para la etapa fenológica j , (cuadro A18).

PMP = Contenido de Humedad del suelo al punto de marchites permanente, 10.48%.

Así, una vez obtenido un valor K_j para cada etapa fenológica, se generaron un total de 8 valores finales de K_{hidr} , resultado del promedio por tratamiento de los K_j mencionados, 4 para los bloques I y III, y 4 para los bloques II y IV

$$\left[K_{hidr} = \left(\sum_{j=1}^5 K_j \right) \div 5 \right].$$

Cálculo de K_{sal}

Para el cálculo del valor de K_{sal} , dado que sólo se cuenta con 2 mediciones de Conductividad Eléctrica (CE) en laboratorio para cada bloque, con muestras de suelo a 40 cm, antes de la siembra y al final del ciclo del cultivo. Se asumió una

distribución lineal del comportamiento de la CE, para poder calcular la media aritmética de ambas mediciones correspondiente a cada bloque, e introducir dichos valores en la siguiente ecuación propuesta por la FAO (1987), y utilizada en la obtención del rendimiento potencial en función de la salinidad:

$$Y = 100 - b (Ec_x - Su)$$

Donde:

Y = Rendimiento potencial, %.

b = disminución de rendimiento por aumento unitario de salinidad.

Su = Salinidad umbral, dS/m.

Ec_x = Conductividad Eléctrica en el extracto de saturación, dS/m.

De tablas, (FAO, 1987):

Su = **1.7** dS/m (salinidad humbral para maíz).

$$b = \frac{100}{Ec_x(\text{para } y = 0 \%) - Su}$$

Ec_x para y = 0 % (Conductividad eléctrica en el extracto de saturación para un rendimiento del 0 %) = **10** dS m⁻¹, (FAO, 1987).

El valor de b resulta:

$$b = \frac{100}{(10 \text{dSm}^{-1} - 1.7 \text{dSm}^{-1})} = 12.048$$

Sustituyendo valores en la ecuación original, ésta queda de la siguiente forma:

$$Y = 100 - (12.048 * (EC_x - 1.7))$$

Finalmente, dado que el porcentaje de rendimiento potencial afectado por la salinidad corresponde a “Y”, éste porcentaje puede ser considerado como el valor de K_{sal}, sustituyendo los valores de CE en EC_x de la ecuación anterior.

Determinación de F

El valor del Factor de restricción del rendimiento por deficiencia de nutrición (Índice integral de Fertilidad), en este caso se obtuvo por despeje de la fórmula original, quedando de la siguiente forma:

$$F = Y / (Y_{\text{máx}} \times K_{\text{hidr}} \times K_{\text{sal}})$$

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. PRECIPITACIÓN PLUVIAL

El ciclo del cultivo de maíz tuvo una duración de 178 días, que comprende del 2 de junio al 26 de noviembre de 2006. Durante este periodo la precipitación total ocurrida fue de 442.8 mm. La probabilidad de ocurrencia de la precipitación en este ciclo del cultivo corresponde al 51.7%, su cálculo, se realizó según la metodología citada por Landeros (2000), con los datos de precipitación de la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados, correspondientes a 21 años de registro (1985-2005), ver Cuadro A-1.

En el cuadro 4, y en la Figura 11 se muestra la distribución de los datos climatológicos considerados de gran importancia en el crecimiento y desarrollo del cultivo, ya que dan idea de las condiciones ambientales que se presentaron en el sitio experimental. Los datos de precipitación corresponden a la lámina mensual acumulada en mm medidos con el pluviómetro; La evaporación, al igual que la precipitación, corresponde a la lámina mensual acumulada en mm medida en el tanque tipo "A" y, los valores de temperatura son promedios mensuales de los datos medios diarios registrados por el termógrafo.

En cuanto a la precipitación, se observa que la máxima se registró en el mes de Julio (etapa vegetativa del cultivo) con una lámina de 95.2 mm, y la mínima en el mes de octubre (etapa de formación del elote y llenado del grano) con 43.3 mm, para concluir el ciclo nuevamente con lluvias en el mes de noviembre con una lámina de 72.7 mm. En lo que respecta a evaporación, la máxima se presenta en Junio (126.3 mm) y va descendiendo levemente hasta el mes de septiembre que se presenta la evaporación mínima que difiere de la máxima sólo por 23.4 mm, cabe destacar que en todos los meses considerados, los valores mensuales de evaporación están por encima de los de precipitación. Finalmente, la temperatura media mensual no presenta variaciones significativas durante los meses de junio a

septiembre, sin embargo de octubre a noviembre se acentúa la baja en temperatura por la llegada de la temporada de otoño.

Cuadro 4. Precipitación y evaporación mensuales y temperatura media mensual ocurridas durante el ciclo del cultivo de maíz. Montecillo, Méx. 2006.

Mes	Variables		
	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)	Temperatura (°C)
Junio	78.4	126.3	17.47
Julio	95.2	106.6	17.22
Agosto	73	108.9	17.29
Septiembre	80.2	102.9	17.29
Octubre	43.3	105.9	16.66
Noviembre	72.7	81.9	13.73
Total	442.8	632.5	-

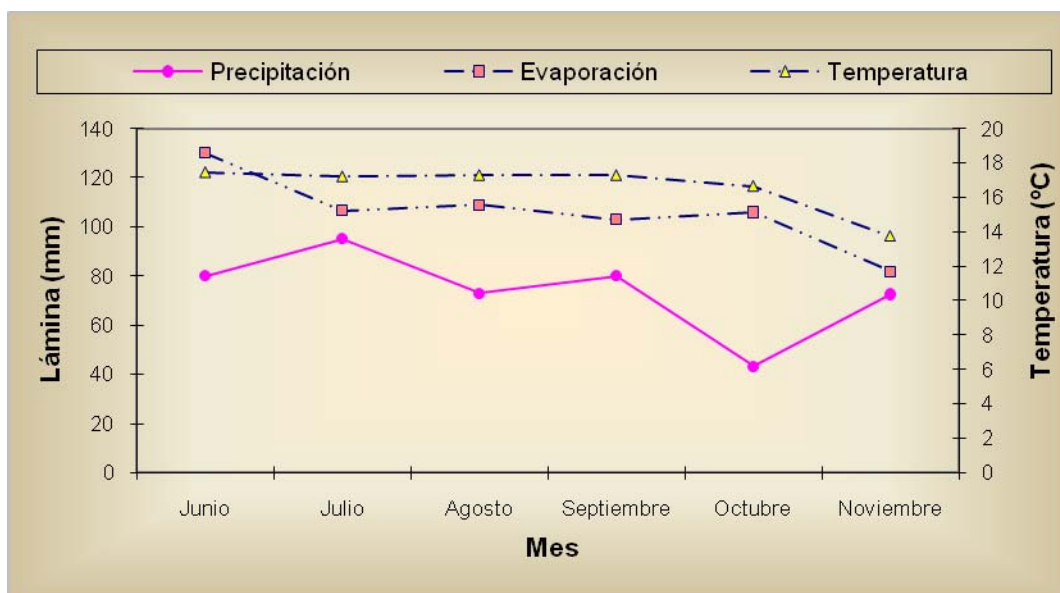


Figura 11. Distribución de la precipitación, evaporación y temperatura en el sitio experimental durante el ciclo del cultivo de maíz. Montecillo, Méx. 2006.

Con el fin de observar la distribución de la precipitación durante el crecimiento del cultivo, se calculó la lámina para cada etapa fenológica, así como su porcentaje respecto del total. De acuerdo con el cuadro 5, el 42.19% de la precipitación total ocurrida a lo largo del ciclo del cultivo se presentó solo en la etapa vegetativa, que

fue la de mayor duración (66 días) dicha precipitación se distribuyó en un total de 42 eventos de lluvia.

En la etapa de llenado del grano los eventos de lluvia se redujeron casi a la mitad (de 42 a 22), en comparación con los presentados en la etapa vegetativa, y la lámina precipitada fue de 127mm, siendo relevante este aspecto en el sentido de que de acuerdo con Waldren (1988), condiciones de estrés hídrico severo durante el llenado del grano puede detener completamente la fotosíntesis, sin embargo, también se afirma que la acumulación de materia seca en el desarrollo del grano puede no ser detenida completamente, debido a que los asimilados pueden ser translocados de otras partes de la planta, reduciéndose solo del 47 al 69% el rendimiento de grano. Los valores de precipitación diarios se presentan en el cuadro A3.

Cuadro 5. Precipitación, su distribución en eventos y lámina (mm) por etapas fenológicas, durante el ciclo del maíz. Montecillo, Mex. 2006.

Etapa Fenológica					Precipitación			
Etapa	Descripción	Duración (días)	Periodo	Días acum.	Lámina total		Evento	
					mm	%	No.	%
I	Establecimiento (siembra, germinación y plántula).	13	2 de junio a 15 de junio	13	36	8.13	4	4.39
II	Vegetativa.	66	16 de junio a 20 de Agosto	79	186.8	42.19	42	46.15
III	Floración (formación de inflorescencia y estigma).	37	21 de Agosto a 26 de Septiembre	116	85.9	19.4	22	24.18
IV	Formación del elote y llenado del grano.	52	27 de Septiembre a 17 de Noviembre	168	127	28.68	22	24.18
V	Madurez.	10	18 de Noviembre a 28 de Noviembre*	178	7.1	1.6	1	1.1
TOTAL				178	442.8	100	91	100

6.2. VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

En el cuadro 6 y en las figuras 12 y 13 se muestran los resultados obtenidos de la prueba de infiltración realizada en el sitio experimental. Los valores indican que la infiltración básica es aproximadamente de 3.74 cm h^{-1} , y se infiltraron 11.45cm de lámina de agua en 146.62 minutos (2 horas con 26 minutos). El contenido de humedad del suelo al momento de la realización de la prueba de infiltración fue de 8.39%.

Cuadro 6. Velocidad de Infiltración (I) e infiltración acumulada (Z) en el sitio experimental. Montecillo, México. 2006.

Tiempo acumulado minutos	Velocidad de Infiltración cm h^{-1}	Infiltración acumulada cm
2.72	9.76	0.58
6.47	7.92	1.12
10.50	7.05	1.63
12.60	6.75	1.87
15.57	6.41	2.19
17.10	6.27	2.35
19.43	6.08	2.59
21.15	5.96	2.77
23.07	5.83	2.95
23.98	5.78	3.04
28.43	5.55	3.46
30.17	5.47	3.62
35.62	5.25	4.11
36.90	5.21	4.22
43.78	5.00	4.81
50.98	4.82	5.39
58.32	4.67	5.97
65.82	4.53	6.55
73.90	4.41	7.15
82.03	4.30	7.74
90.47	4.20	8.34
98.28	4.11	8.88
106.78	4.03	9.45
109.42	4.01	9.63
117.15	3.94	10.14
124.93	3.88	10.65
132.58	3.83	11.14
139.62	3.78	11.59
146.62	3.74	12.03

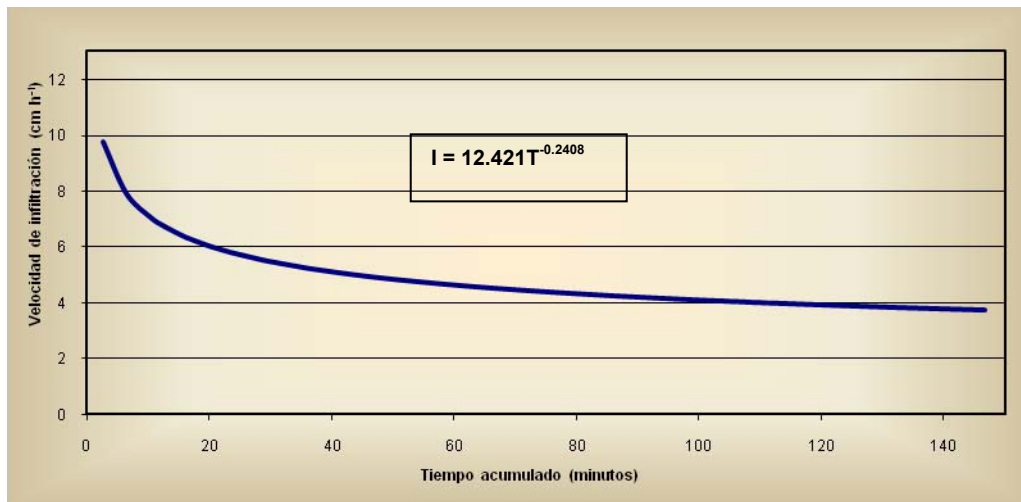


Figura 12. Velocidad de Infiltración (I) en el sitio experimental. Montecillo, Méx. 2006.

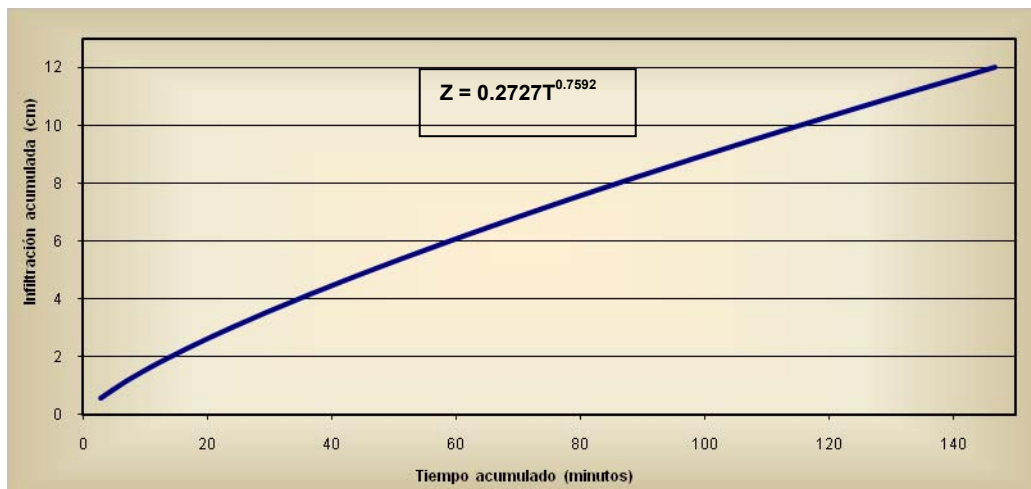


Figura 13. Infiltración acumulada (Z) en el sitio experimental. Montecillo, Méx. 2006.

6.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO

El cálculo de la evapotranspiración potencial ó Uso consuntivo del cultivo de maíz de la variedad San Josecito para este ciclo (Junio-Noviembre) resultó ser de 646.2 mm, y se calculó siguiendo la metodología de Blaney y Criddle citada por Tijerina (2005), cuadro 5. Comparando los resultados obtenidos de uso consuntivo del cultivo de maíz con los de precipitación ocurrida en el ciclo (442.8 mm), se observa que hubo un déficit hídrico de 203.4 mm.

Cuadro 7. Cálculo de la Evapotranspiración potencial del cultivo de maíz, por el método de Blaney y Criddle. Periodo: Junio-Noviembre de 2006. Montecillo, Méx.

Datos climatológicos	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Total
Temperatura media °C	17.47	17.22	17.29	17.29	16.66	13.73	
Precipitación (mm)	78.40	95.20	73.00	80.20	43.30	72.70	
Evaporación (mm)	126.30	106.60	108.90	102.90	105.90	81.90	
% Horas luz (P)	8.97	9.20	8.92	8.28	8.19	7.63	
$(T+17.8)/21.8$	1.62	1.61	1.61	1.61	1.58	1.45	
$f_i = \left[\frac{T+17.8}{21.8} \right]^* P$	14.51	14.78	14.36	13.33	12.95	11.04	80.97
Kt_i	0.78	0.78	0.78	0.78	0.76	0.67	
f^*Kt_i	11.37	11.47	11.17	10.37	9.82	7.36	
Kc_i (Coef. De Grassi y Christiansen con K_G=0.8)	0.30	0.68	0.92	1.02	1.00	0.86	
$UC' = Kc_i Kt_i f_i$, [cm]	3.41	7.80	10.28	10.58	9.82	6.33	48.22
$K_G' = UC' / \sum f_i = 48.22/80.97 = 0.595 \neq K_G = 0.8$							$C = K_G / K_G' = 0.8/0.595 = 1.34$
$\therefore UC = UC' * C$, [cm]	4.57	10.45	13.78	14.18	13.16	8.48	64.62

6.4. ANÁLISIS DE LA HUMEDAD DEL SUELO

Desde el día en que se realizó la siembra y a través de todo el ciclo del cultivo se registraron cada tercer día los valores arrojados por el sensor de humedad modelo CR500, en cada una de las unidades experimentales del trabajo de investigación, acumulándose un total de 89 fechas de registro en total. El análisis estadístico de los contenidos de humedad gravimétricos calculados se realizó para todas y cada una de las fechas de registro, y éste incluyó el análisis de varianza (ANVA) y la prueba de comparación de medias de Tukey.

Para comprender mejor el comportamiento de la humedad contenida en el suelo a lo largo del periodo de estudio, se ha dividido su análisis por etapa fenológica y éste se presenta a continuación.

6.4.1. Etapa de establecimiento del cultivo

En los cuadros A4 y A5 se presentan los valores medios del contenido de humedad gravimétrico, medidos a lo largo de la etapa de establecimiento del cultivo de maíz, así como los resultados obtenidos de la prueba de comparación

de medias mediante la prueba de Tukey, a las profundidades de 0-15 cm y 15-30 cm respectivamente.

Posteriormente, dichos valores se convirtieron de contenido de humedad gravimétrico en lámina mediante la siguiente expresión, Aguilera y Martínez (1996):

$$L = P_s \times D_a \times P_r$$

Donde:

L = Lámina de agua, cm.

P_s = Contenido de humedad, %.

D_a = Densidad aparente, adimensional.

P_r = Profundidad radicular, cm.

El valor de D_a en este caso corresponde a 1.32 (apartado 5.1.3.1.), y la profundidad es de 15 ó 30 cm, según sea el caso.

La figura 14 muestra claramente el comportamiento de la lámina presente en el suelo a las profundidades de estudio (15 y 30 cm), así como la precipitación ocurrida en la etapa de establecimiento del cultivo. Los valores de lámina correspondientes a la profundidad de 15 cm difieren aproximadamente 4 cm comparados con los presentados a la profundidad de 30 cm, siendo éstos últimos mayores.

En cuanto al análisis estadístico, al realizar el ANVA al contenido de humedad a la profundidad de 15 cm, se presentaron diferencias significativas durante los días 2, 7 y 11 de Junio y, el realizado al contenido de humedad a 30 cm de profundidad arrojó resultados similares, aunque las diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) se presentaron en un día diferente (el 5 de junio, en lugar del 11). De la prueba de Tukey, las diferencias significativas se observan entre los tratamientos B y C en comparación con los tratamientos A y D, y las similitudes entre: B y C al igual que entre A y D (en todos los casos), Cuadros A4 y A5.

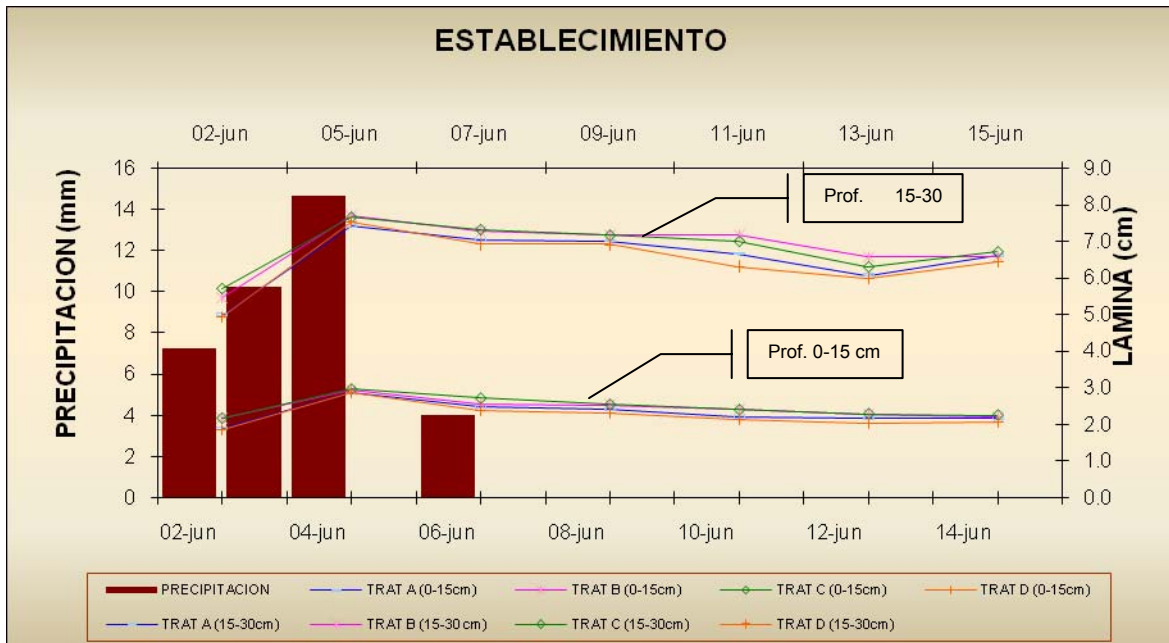


Figura 14. Lámina (cm) contenida en el suelo a las profundidades de 15 y 30 cm, y precipitación (mm) ocurrida durante la etapa del establecimiento.

Basándose en el hecho de que la humedad aprovechable por las plantas se define como la diferencia de contenido de humedad entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) Aguilera y Martínez (1996), se determinó la “lámina aprovechable” para cada fecha de observación en las dos profundidades de estudio.

A la profundidad de 15 cm, el límite superior es la lámina correspondiente a CC (3.45 cm) y, el límite inferior la de PMP (2.13 cm). A 30 cm, los valores de contenido de humedad transformados en lámina a CC y PMP resultaron ser de 6.9 y 4.3 cm respectivamente.

En la figura 15 se muestra de manera gráfica la lámina aprovechable a lo largo de la etapa de establecimiento del cultivo de maíz y, al respecto, cabe destacar como el tratamiento D (testigo) presenta los valores más pequeños de “Lámina aprovechable” contenida en el suelo, además de ser el único que se encuentra en 3 fechas por debajo de PMP y, que el tratamiento C se encuentra la mayor parte del tiempo por encima de los demás tratamientos.

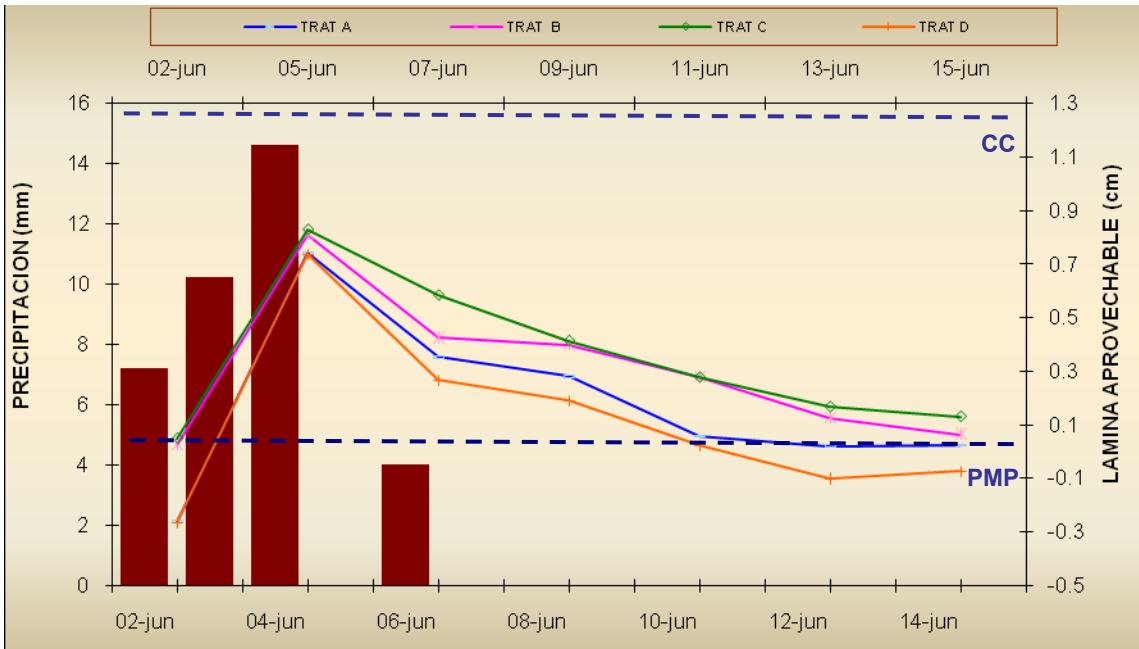


Figura 15. Lámina aprovechable a la profundidad de 15 cm en la etapa de establecimiento del cultivo.

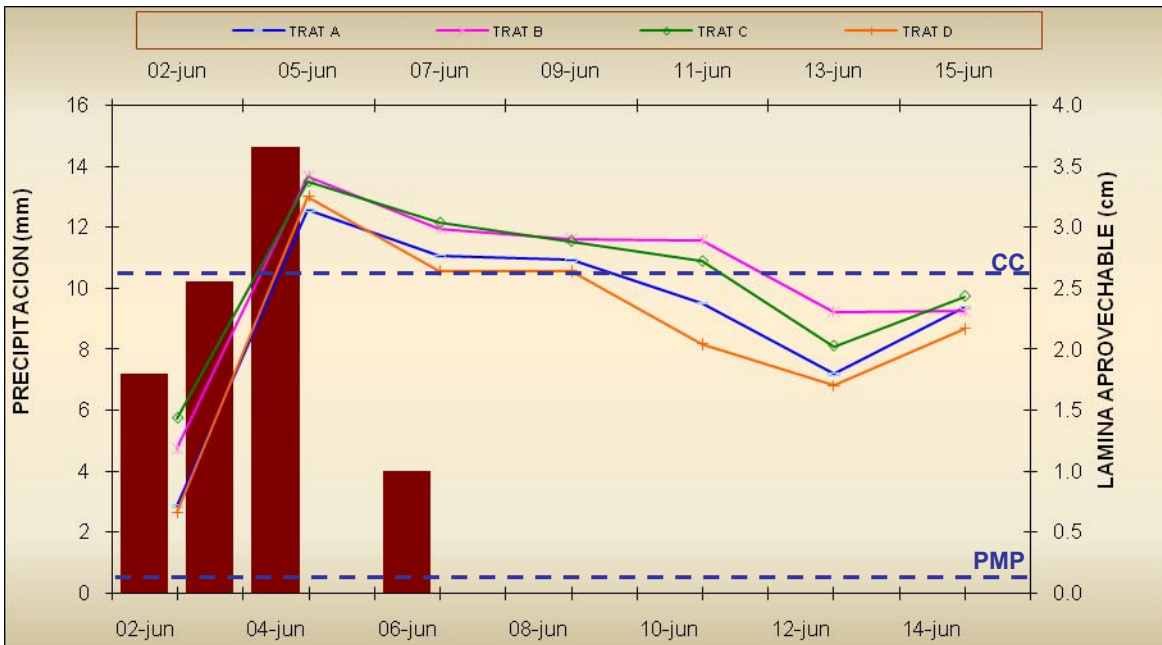


Figura 16. Lámina aprovechable a la profundidad de 30 cm en la etapa de establecimiento del cultivo.

De acuerdo con la figura 16, durante la etapa de establecimiento del cultivo, los valores de lámina aprovechable en el suelo estuvieron por encima de la lámina a CC la mayor parte del tiempo (4 de 7 fechas de registro), siendo en este caso los

tratamientos B y C los que alternadamente presentaron las láminas más altas y, nuevamente el tratamiento D se encontró predominantemente por debajo de los demás tratamientos.

6.4.2. Etapa vegetativa

La etapa vegetativa constó de 66 días, con un total de 33 fechas de registro de contenido de humedad gravimétrico, datos a los que, al igual que en la etapa de establecimiento, se les realizó el ANVA ($\alpha = 0.05$) y la prueba de comparación de medias de Tukey (Cuadro A6).

De la figura 17 se tiene que, aunque el comportamiento de la lámina contenida en el suelo a las dos profundidades de estudio fue similar, la separación entre ambas se mantuvo a lo largo de toda la etapa vegetativa, oscilando entre los 3 y 4 cm. También se observa que los eventos de lluvia fueron constantes, sin embargo, fueron 2 los que incrementaron de manera significativa la lámina contenida en el suelo: el evento del 12 de julio (15.4 mm) que cambió de ± 1.9 a ± 2.5 cm los valores de lámina registrados a 15 cm y de ± 5.7 a ± 7.2 cm a 30 cm; y el evento del día 22 de julio (31.3 mm), que fue el mayor presentado en esta etapa, que elevó la lámina de ± 2.0 a ± 3.2 cm a 15 cm de profundidad y de ± 5.8 a ± 8.0 cm a 30 cm de profundidad.

A 15 cm de profundidad, se observó que los tratamientos A y D presentaron en 16 de 33 fechas de registro, valores de lámina de agua contenida en el suelo por debajo de PMP, esto representa el 48.4 % del total, a diferencia de los tratamientos B y C que estuvieron debajo de PMP por 10 (30.3%) y 9 (27.3%) días respectivamente. Del ANVA se tiene que existieron diferencias significativas entre tratamientos ($\alpha = 0.05$) en 13 fechas (denotadas en la gráfica de la figura 18 con el símbolo \diamond). De acuerdo con la prueba de Tukey, dichas diferencias se presentaron, en general, entre los tratamientos B y C comparados con A y D, y

siendo similares los tratamientos B y C, al igual que A comparado con D, ver Cuadro A6.

En la figura 19, se observan los valores de lámina aprovechable a 30 cm de profundidad, y aquí a diferencia de los resultados obtenidos a 15 cm, éstos se encuentran siempre por encima de PMP, incluso en 12 fechas sobrepasan CC, esto se atribuye al hecho de que las lluvias se presentaron de manera frecuente a lo largo de toda esta etapa, y de que a mayor profundidad el suelo va cambiando de franco arenoso a franco arcillo arenoso (Cuadro 1), propiedad que ayuda al incremento de su capacidad de retención de humedad, siendo mayor en un suelo arcilloso que en un arenoso, (Aguilera y Martínez, 1996).

Del ANVA, las diferencias significativas ($\alpha= 0.05$) entre tratamientos se presentaron en 14 fechas, coincidiendo en un 85% con las encontradas a la profundidad de 15 cm y, coincidiendo también en que estas diferencias se presentan en la mayoría de los casos entre B y C comparados con A y D, aunque ahora existe mayor variabilidad ya que 6 ocasiones, el tratamiento B coincide no solo con C sino también con A y D. En lo concerniente a las similitudes, continúan siendo entre el tratamiento A comparado con el tratamiento D y entre el tratamiento B comparado con el C. Todo lo anterior se presenta de manera más clara en el cuadro A7.

En las gráficas presentadas en las figuras 18 y 19, el símbolo “ \diamond ” colocado sobre las curvas generadas de lámina aprovechable, denota las fechas en las que se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, y al respecto se puede decir que éstas se iban presentando a medida que disminuía el contenido de humedad en el suelo, atribuyéndose este hecho al efecto de la forma de las microcuencas de captación.

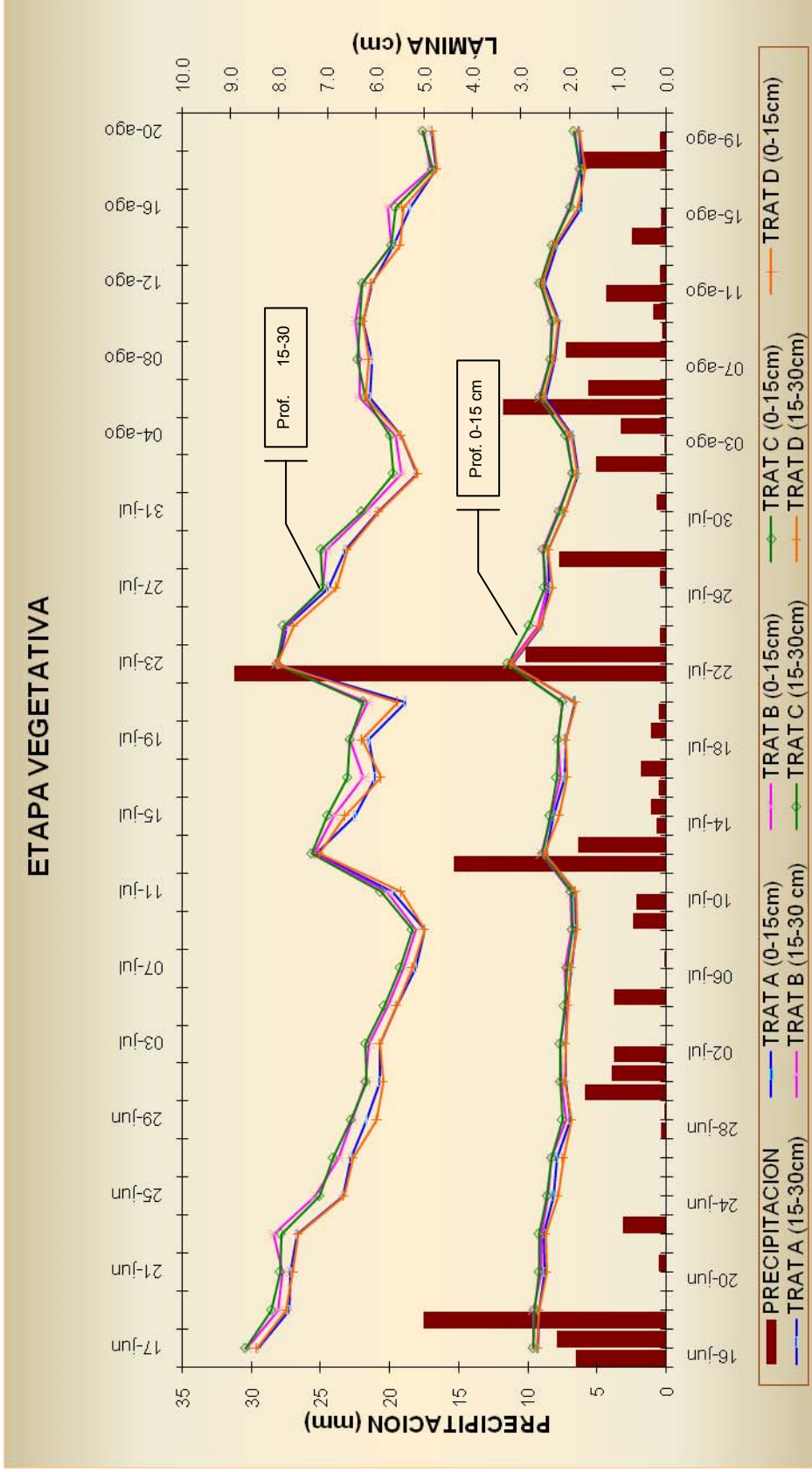


Figura 17. Lámina (cm) contenida en el suelo a las profundidades de 15 y 30 cm, y precipitación (mm) ocurrida durante la etapa vegetativa.

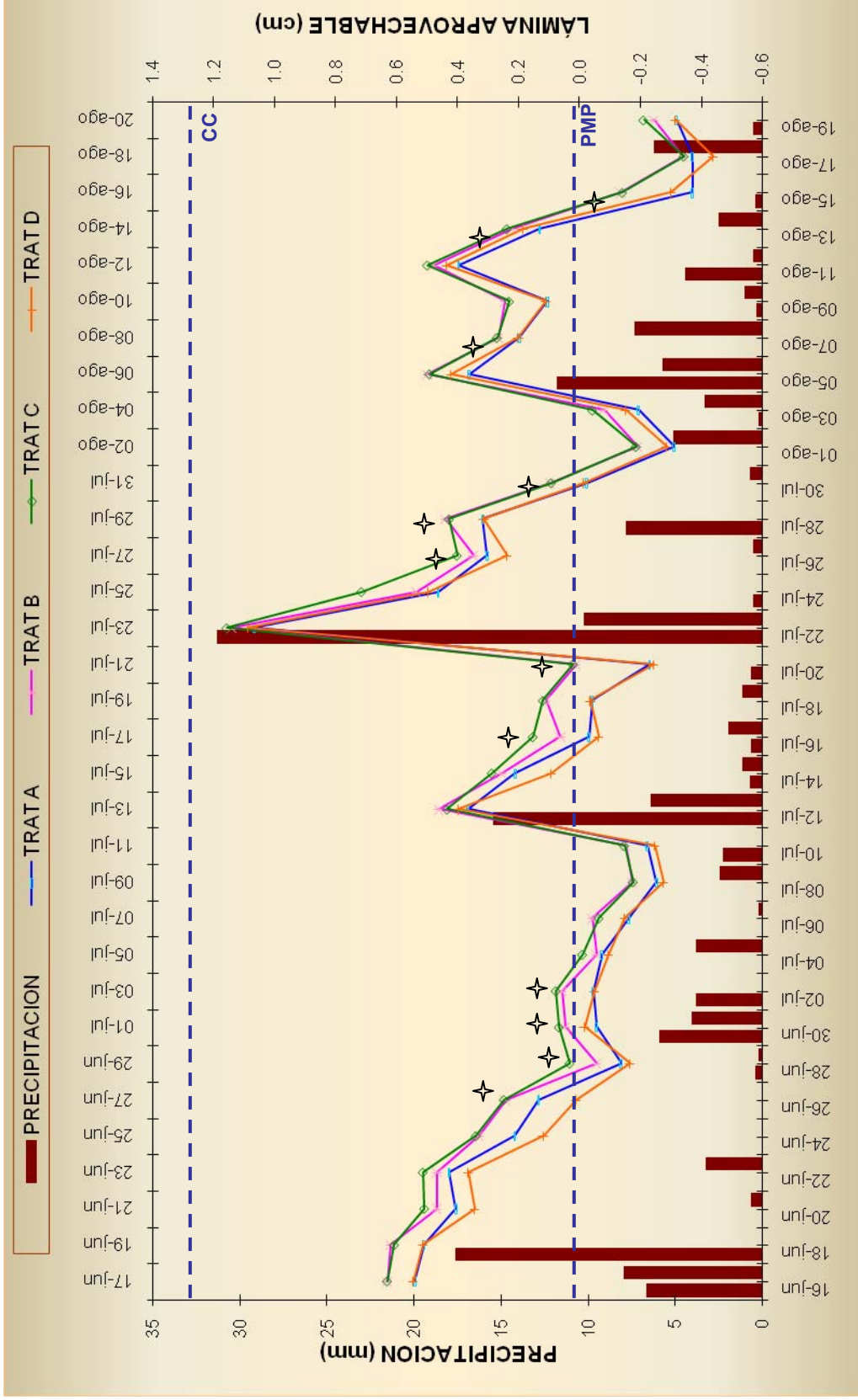


Figura 18. Lámina aprovechable a la profundidad de 15 cm en la etapa vegetativa del cultivo.

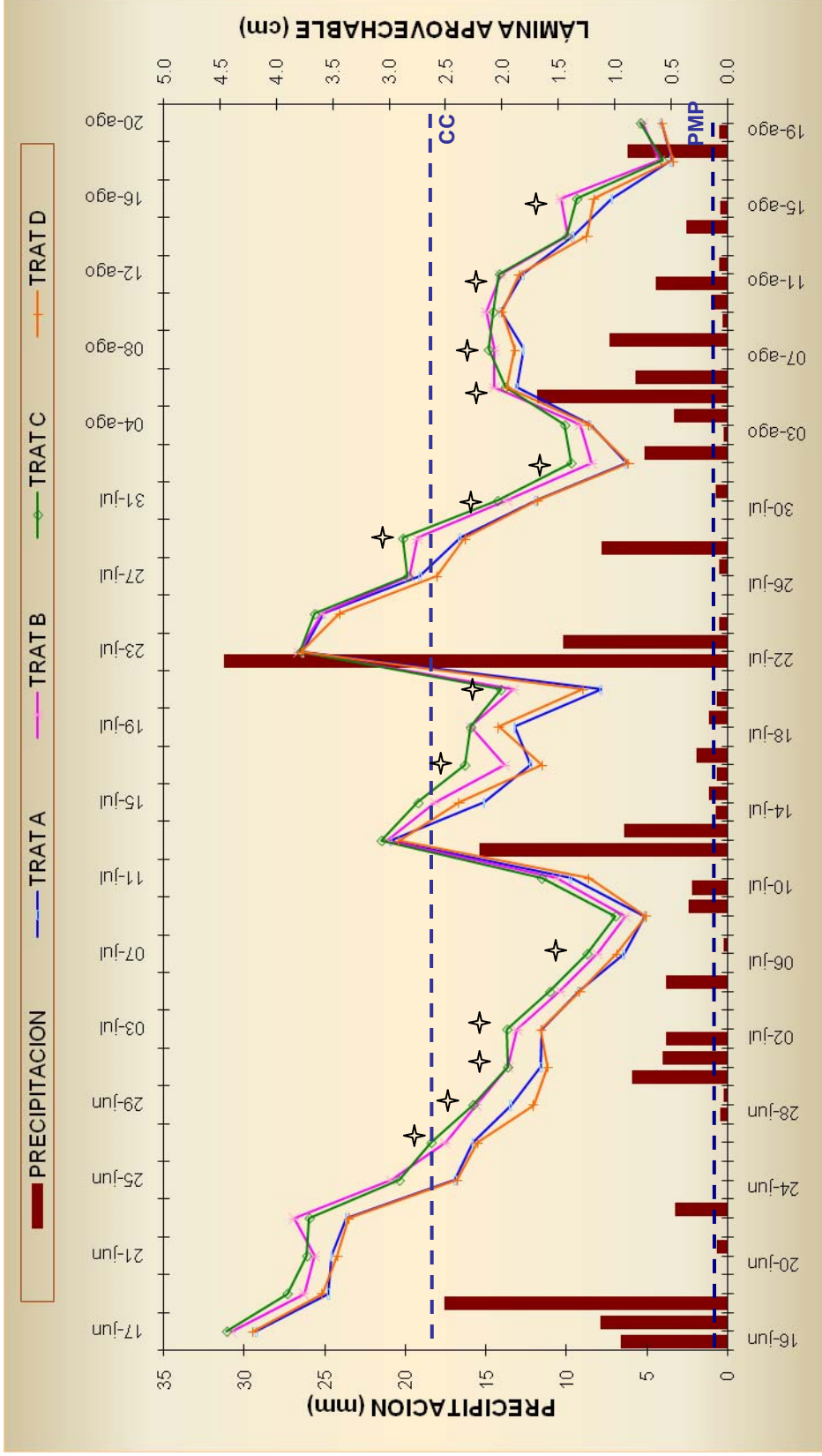


Figura 19. Lámina aprovechable a la profundidad de 30 cm en la etapa vegetativa del cultivo.

6.4.3. Etapa de floración

La etapa de floración tuvo una duración de 37 días, comprendidos del 21 de agosto al 26 de septiembre, periodo en el que se produjeron un total de 22 eventos de lluvia, figura 20, resaltando 3 por su magnitud y el incremento generado en los valores de lámina registrados a las profundidades de 15 y 30 cm, dichos eventos se presentaron los días 25 de Agosto, 8 de septiembre y 22 de septiembre, con 11.9, 15.9 y 12.6 mm de precipitación respectivamente, Cuadro A3.

A la profundidad de 15 cm, de acuerdo con la figura 21, la precipitación ocurrida no fue suficiente para mantener los niveles de lámina contenida en el suelo dentro del rango “aprovechable”, incluso en las fechas en las que se produjeron los eventos de lluvia mayores, mencionados previamente, solo en 2 de los 3 (los eventos del 25 de agosto y el 8 de septiembre) se lograron láminas por encima de PMP. Y, aún con el hecho de que gráficamente su comportamiento se observa agrupado de 2 en 2, esto es, los tratamientos B y C siempre sobre los tratamientos A y D, el ANVA a esta profundidad solo presentó diferencias significativas ($\alpha=0.05$) los días 7, 15 y 23 de septiembre. De la prueba de comparación de medias de Tukey, lo más destacado fue que el tratamiento C resultó ser diferente de los tratamientos A y D pero igual al tratamiento B en los tres casos, el tratamiento A fue igual a B (en 2 ocasiones) y a D (en las tres fechas) pero fue diferente de C, de acuerdo con el cuadro A8.

A diferencia de lo ocurrido a 15 cm, a 30 cm de profundidad, los valores de la lámina aprovechable se encontraron siempre dentro de los límites de CC y PMP (figura 22), lo cual resulta muy conveniente para el desarrollo adecuado del cultivo de maíz, puesto que en esta etapa, la falta de humedad puede provocar el aborto de parte de las flores y el angostamiento de las hojas superiores, y con ello la polinización puede verse perjudicada y la cosecha reducida más o menos drásticamente, (Llanos, 1984, y Doorenbos, 1986).

El ANVA solo presentó diferencias significativas en una fecha, el día 5 de septiembre. De acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), las diferencias significativas se presentaron al comparar los tratamientos A contra B, A contra C y C contra D, y las similitudes al comparar A contra D, B contra C y B contra D.

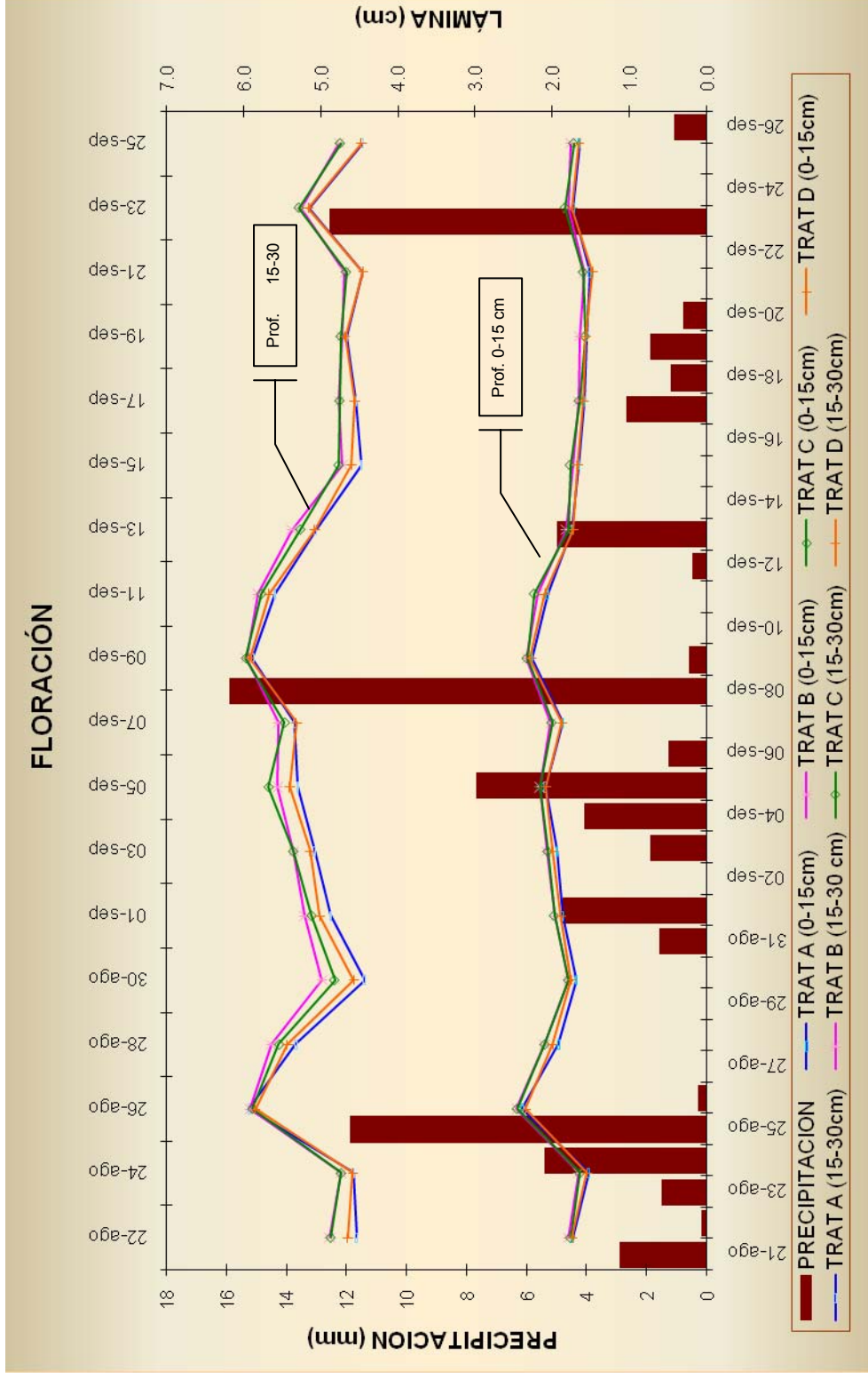


Figura 20. Lámina (cm) contenida en el suelo a las profundidades de 15 y 30 cm, y precipitación (mm) ocurrida durante la etapa de floración.

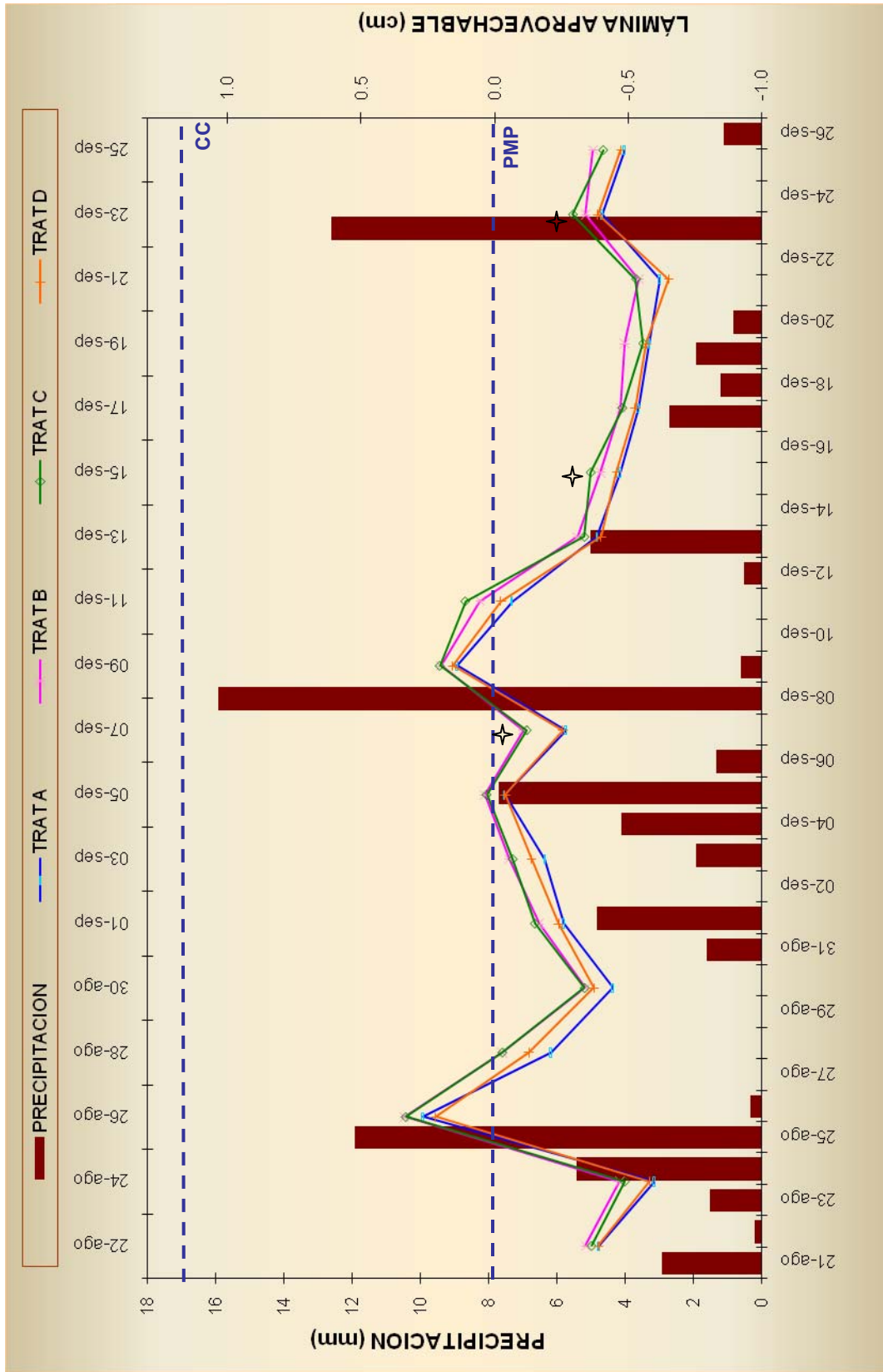


Figura 21. Lámina aprovechable a la profundidad de 15 cm en la etapa de floración del cultivo.

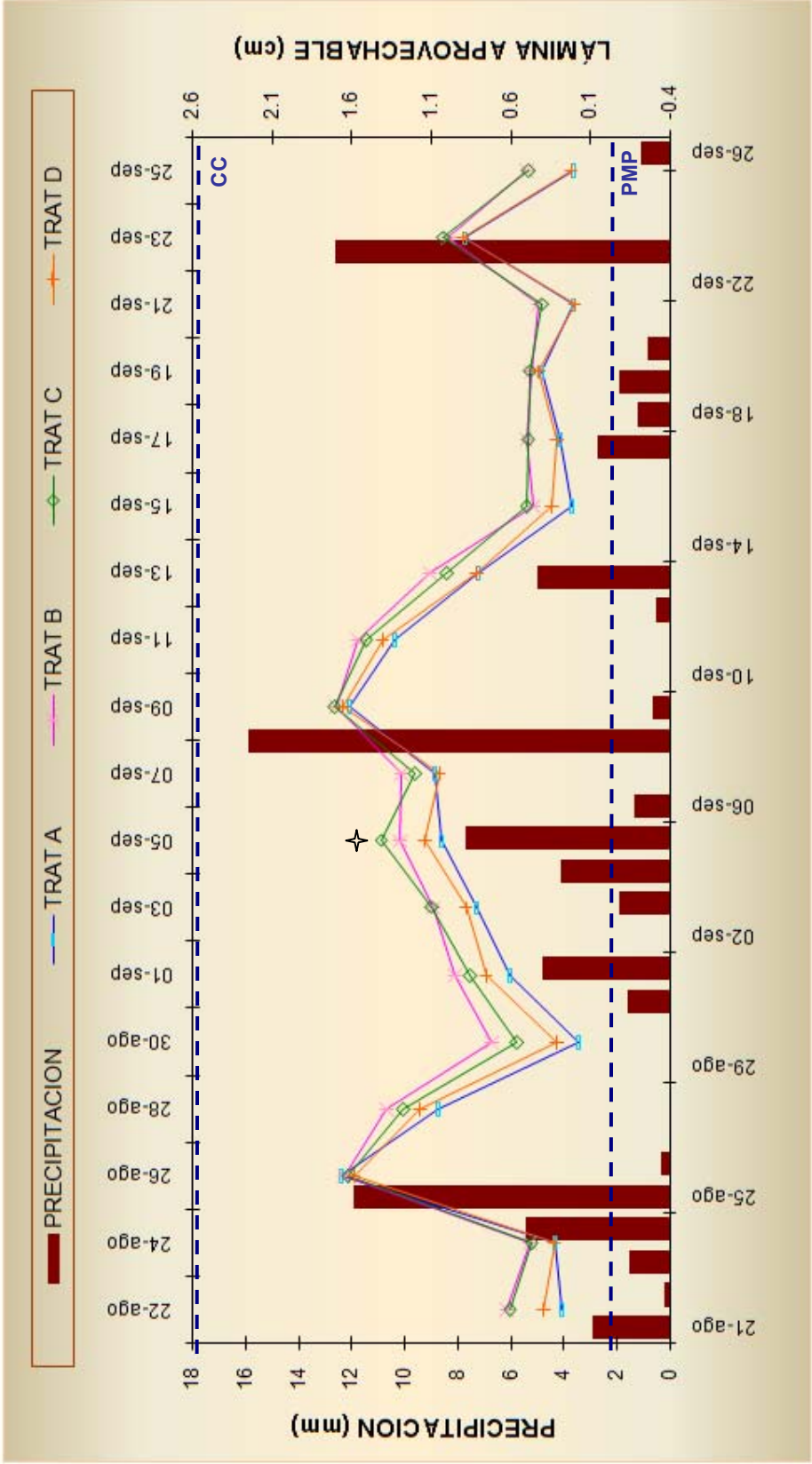


Figura 22. Lámina aprovechable a la profundidad de 30 cm en la etapa de floración del cultivo.

En el presente experimento se esperaba que a medida que descendiera el contenido de humedad, las diferencias entre tratamientos se acentuaran, asumiendo que las microcuencas de captación provocarían ese efecto. Este hecho contrasta con los resultados obtenidos en la etapa de floración, en la que aún cuando los contenidos de humedad en el suelo eran bajos, no se presentaron diferencias significativas. Lo anterior se explica debido a que a pesar de la frecuencia de los eventos de lluvia, éstos no fueron de intensidad suficiente para provocar escurrimientos ó almacenamientos en las microcuencas, distribuyéndose e infiltrándose de manera uniforme en el suelo, estando éste nivelado.

6.4.4. Etapa de formación del elote y llenado del grano

La etapa de formación del elote y llenado del grano se llevó un total de 52 días, 14 días menos que la etapa vegetativa que fue la de mayor duración, y comprendió del día 27 de septiembre al 17 de noviembre de 2006.

El valor de la lámina precipitada total ocurrida en este periodo fue de 127 mm, de la cual, el 44.8 % corresponde a un solo evento de lluvia presentado el día 13 de noviembre que fue de 55.9 mm, y que incrementó los valores de lamina contenida el suelo de ± 1.7 a ± 2.3 cm a la profundidad de 15 cm y, de 6.1 a 8.2 cm a 30 cm de profundidad. La diferencia entre los valores de lámina a 15 y 30 cm de profundidad fluctúa entre los 3 y 4 cm, a lo largo de toda la etapa, Figura 23.

A 15 cm de profundidad, Figura 24, los valores de lámina aprovechable se mantuvieron la mayor parte del tiempo (85 %) por debajo de PMP (2.13 cm). Las fechas en las que la lámina calculada a partir de los contenidos de humedad en el suelo entran en el rango de lámina aprovechable corresponden a las mediciones realizadas un día después de los 3 eventos de lluvia de mayor magnitud, los días 30 de septiembre, 10 de octubre y 13 de noviembre. Del

ANVA, se presentaron diferencias significativas en 10 de las 26 fechas de registro, y éstas se observaron a medida que disminuía el contenido de humedad, posteriores a los eventos de lluvia mencionados anteriormente, dichas diferencias siguen siendo entre los tratamientos C y D ó entre A y B principalmente, y las coincidencias entre B-C y entre A-D, prueba de Tukey (Cuadro A10).

A 30 cm, los valores de lámina calculados se mantuvieron la mayor parte del tiempo dentro del intervalo aprovechable (figura 25), y solo los tratamientos A y D estuvieron en 3 fechas por debajo de PMP. A esta profundidad, solo se presentaron diferencias significativas en 4 fechas: el 7, 21 y 23 de octubre y el 2 de noviembre, días en los que la lámina se encontraba entre los valores más bajos.

De acuerdo con estos resultados, no hay indicios de que el cultivo de maíz haya estado sometido a déficit hídrico en esta etapa del desarrollo que pudiese haberse traducido en una reducción del rendimiento debido a la disminución del tamaño del grano, (Doorenbos, 1986). El hecho de que hayan existido diferencias a 15 cm de profundidad que no se presentaron a 30 cm, puede deberse a que existía agua retenida en el suelo, producto de la frecuencia de lluvia ocurrida en las etapas anteriores, y puesto que en esta ocasión la intensidad de 3 eventos de lluvia fue considerable, ésta provocó que a 15 cm la forma de las microcuencas si surtiera el efecto esperado, éste es, de que existieran diferencias en el contenido de humedad medido en el suelo.

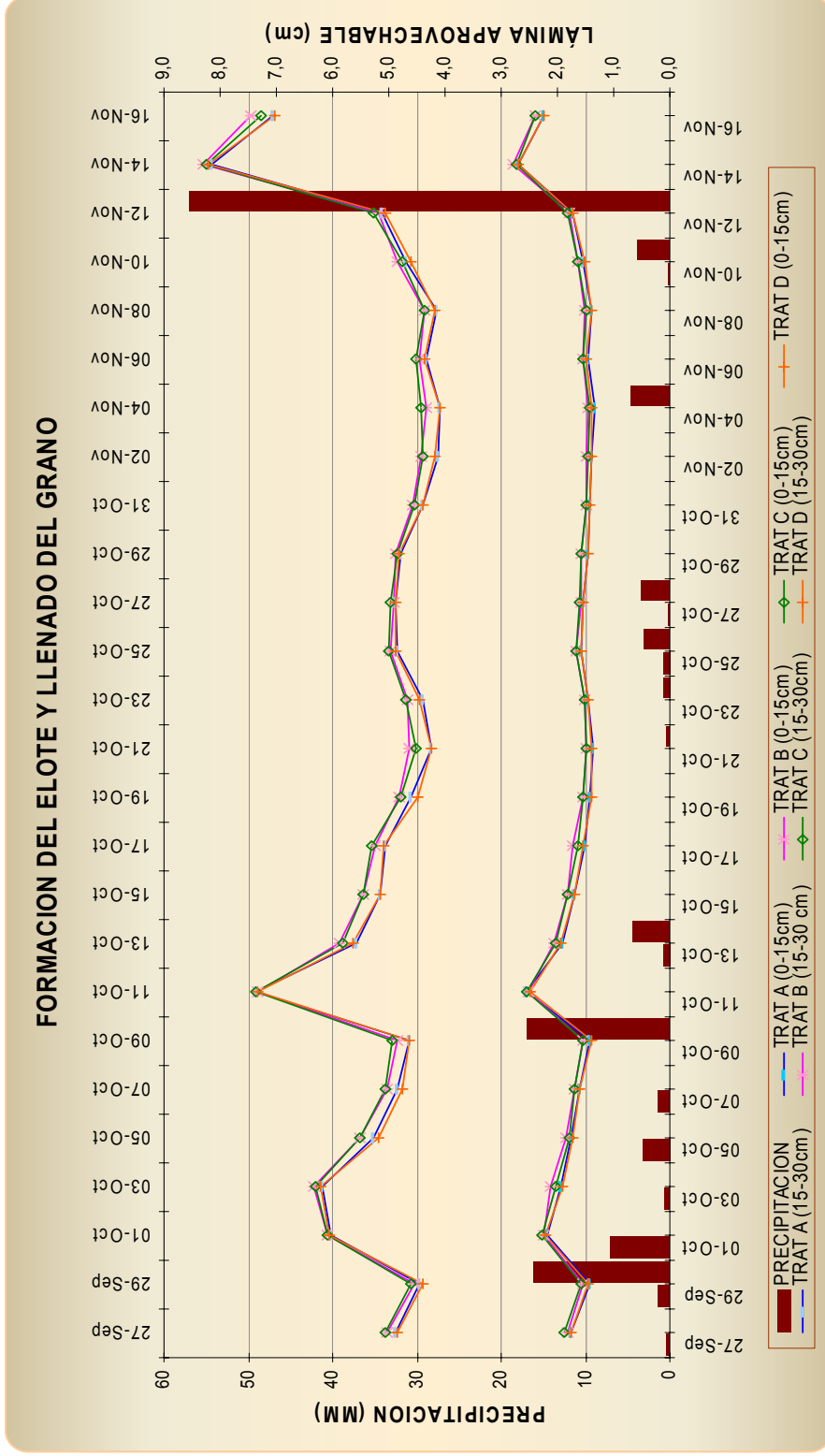


Figura 23. Lámina (cm) contenida en el suelo a las profundidades de 15 y 30 cm, y precipitación (mm) ocurrida durante la etapa de deformación del elote y llenado del grano.

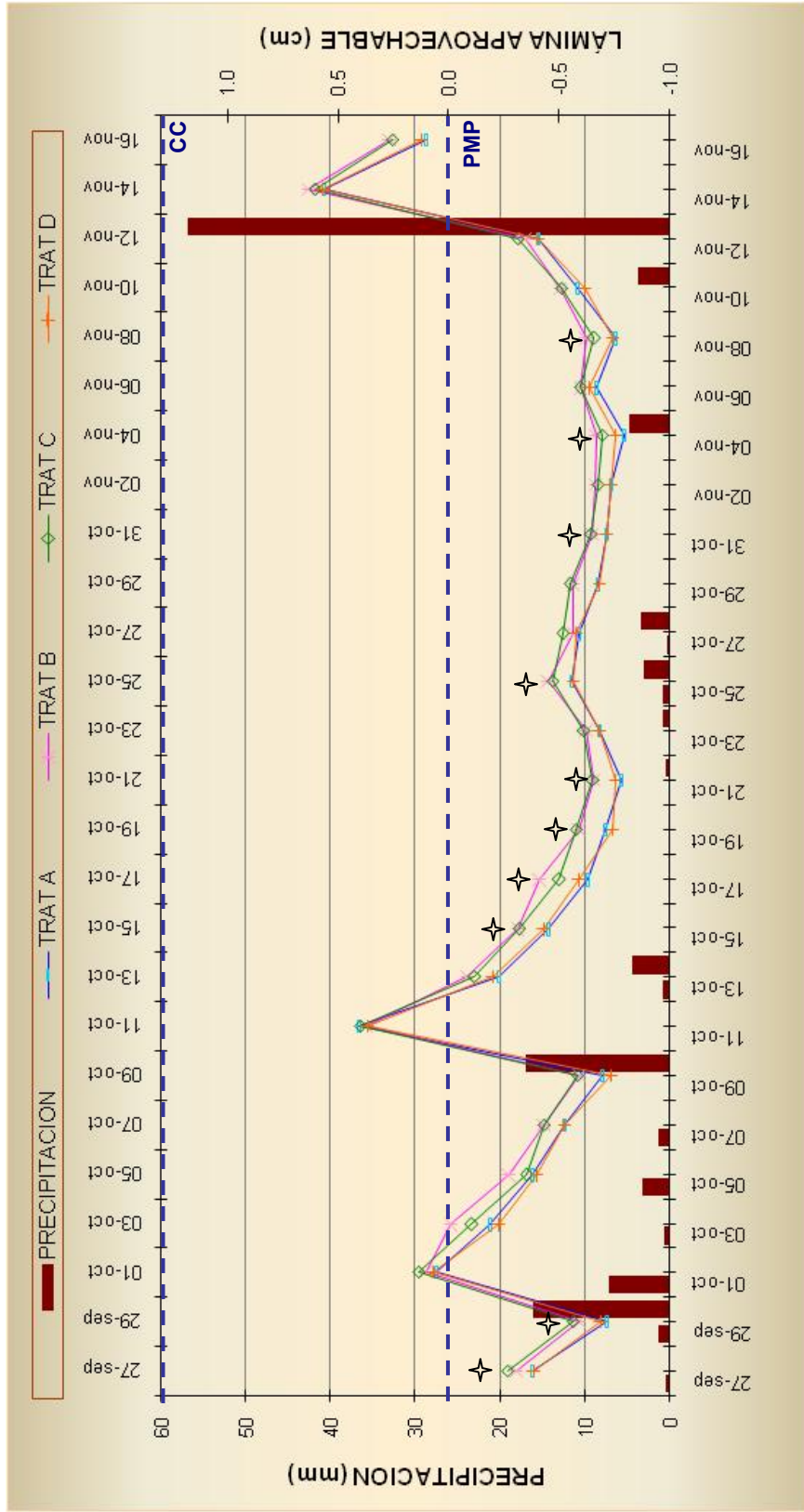


Figura 24. Lámina aprovechable a la profundidad de 15 cm en la etapa de formación del elote y llenado del grano.

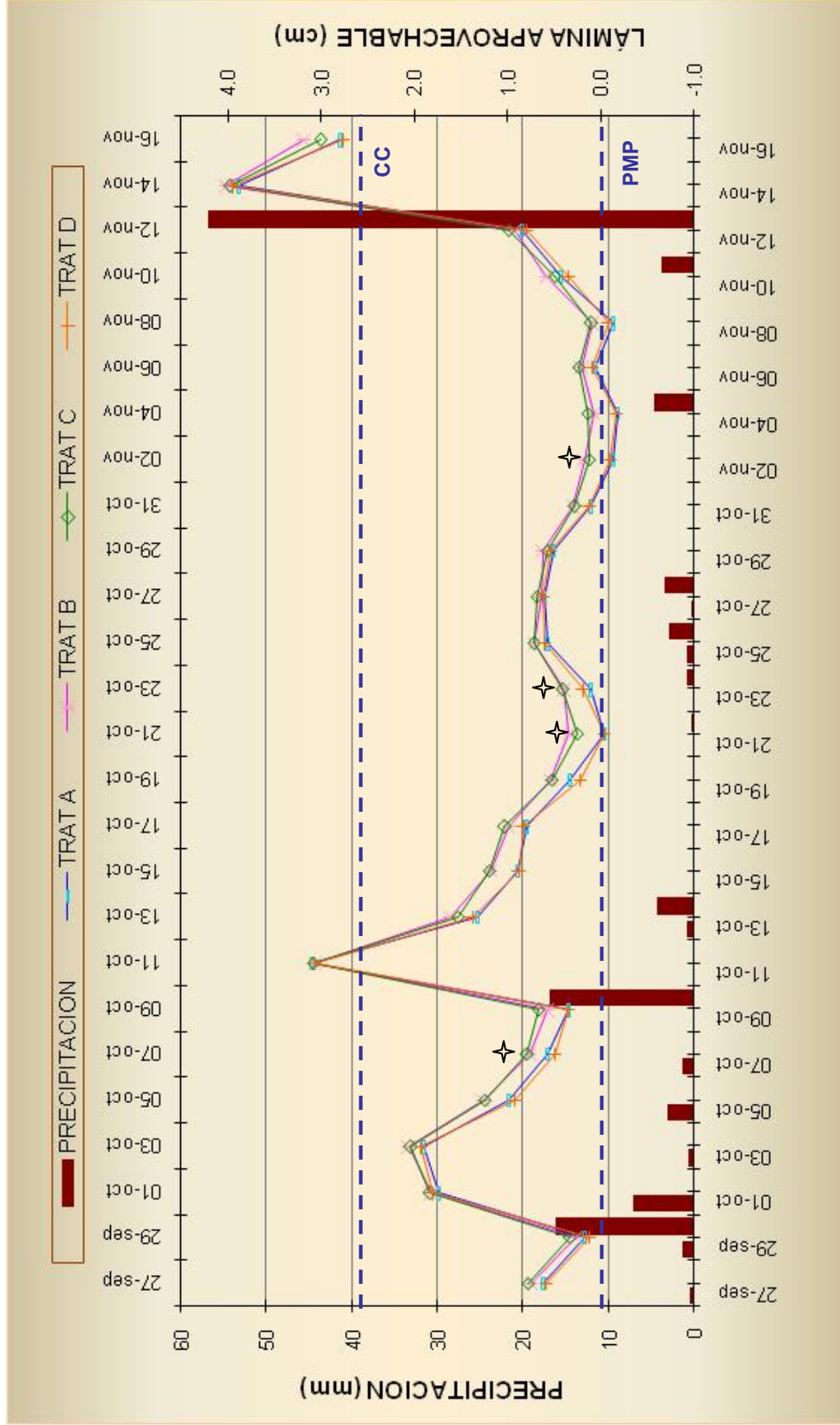


Figura 25. Lámina aprovechable a la profundidad de 30 cm en la etapa de formación del elote y llenado del grano.

6.4.5. Etapa de madurez

De la etapa de madurez no hay mucho que discutir, puesto que sólo se tiene registro de contenido de humedad de 5 fechas, debido a que, como se mencionó en el apartado 4.4.4., se apresuró el secado de las plantas mediante el corte y “amogotamiento” de éstas.

Sin embargo, resulta importante resaltar el hecho de que el contenido de humedad medido en el suelo no presenta disminuciones drásticas (Figura 26), como en las etapas anteriores, ya que la planta, en estos días finales de su ciclo productivo, requiere sólo de un tiempo relativamente seco, (Llanos, 1984).

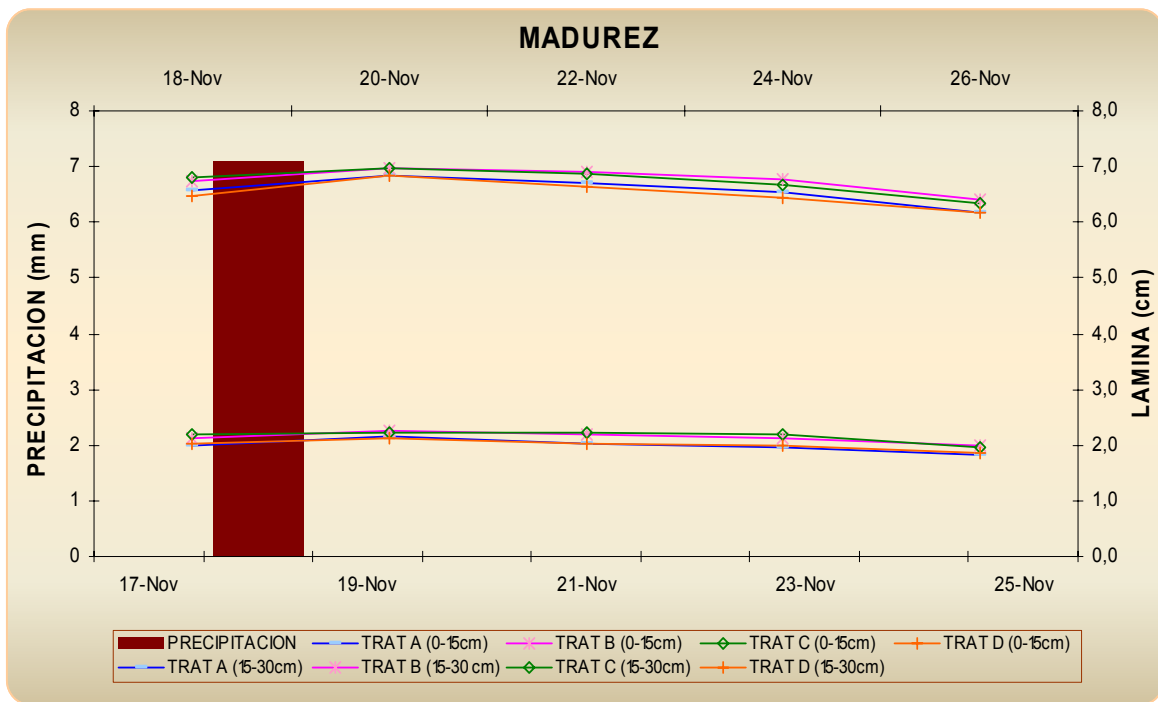


Figura 26. Lámina (cm) contenida en el suelo a las profundidades de 15 y 30 cm, y precipitación (mm) ocurrida durante la etapa de madurez.

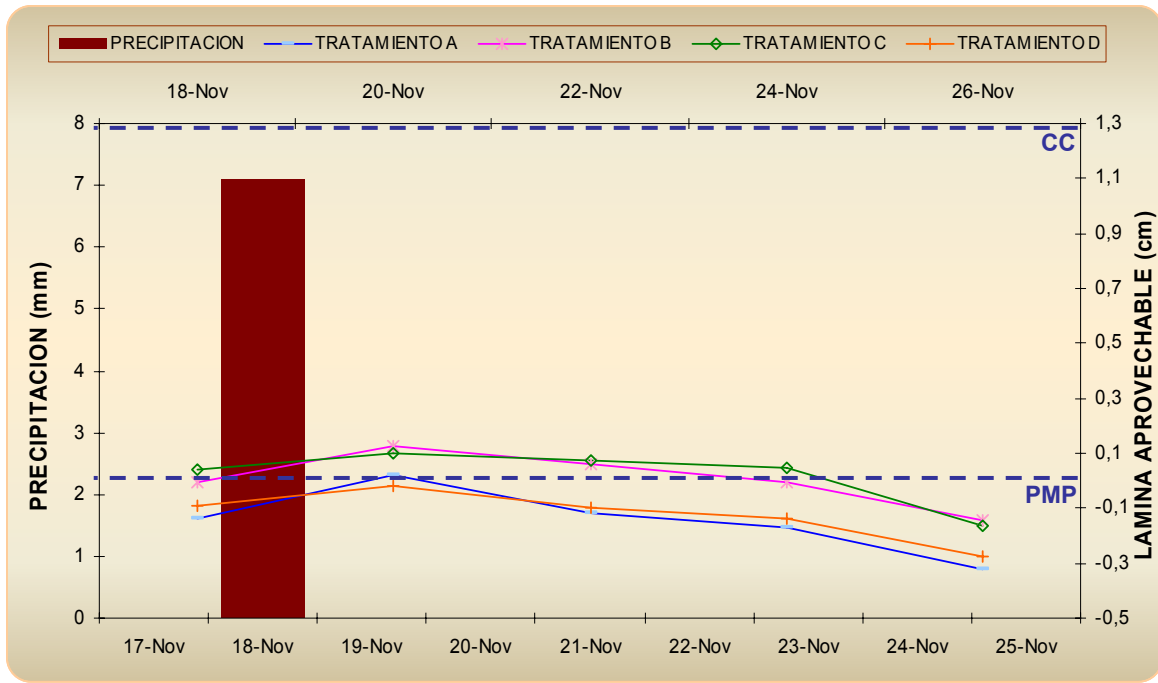


Figura 27. Lámina aprovechable a la profundidad de 15 cm en la etapa de madurez del cultivo.

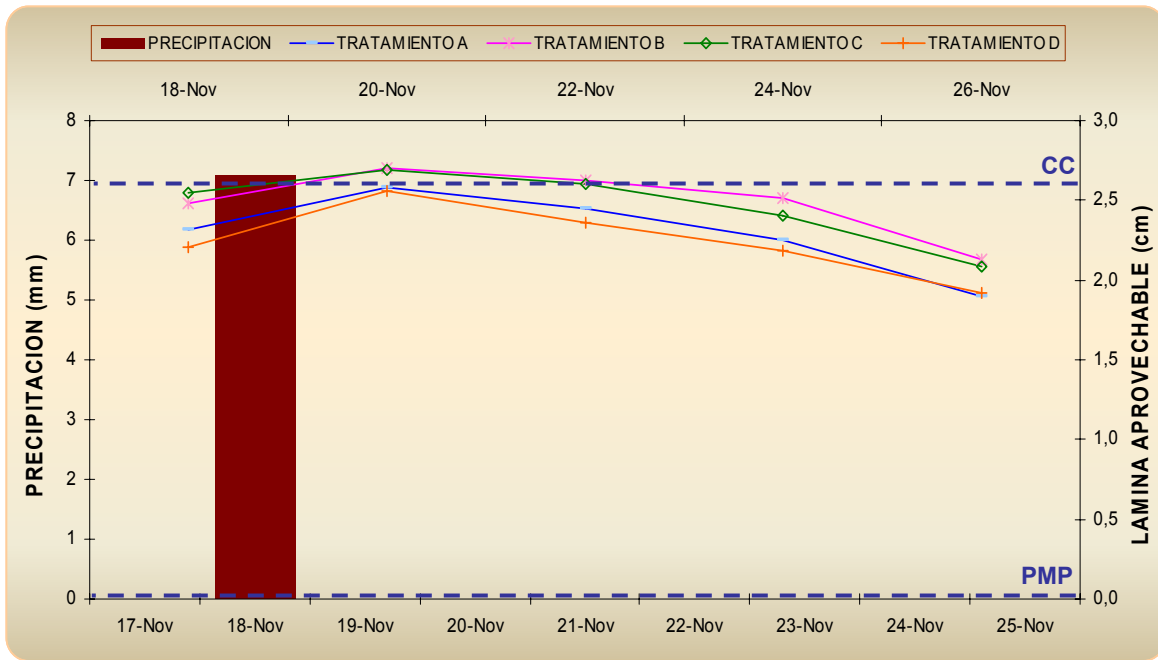


Figura 28. Lámina aprovechable a la profundidad de 30 cm en la etapa de madurez del cultivo.

Las figuras 27 y 28 muestran los valores de lámina aprovechable a 15 y 30 cm de profundidad respectivamente.

A 15 cm, en las 5 fechas, se encuentran por debajo de PMP los tratamientos A y D. Y, a 30 cm todos los tratamientos están dentro del rango “aprovechable”.

Así se concluye que en esta etapa, la disminución en el contenido de humedad se atribuye principalmente a la evaporación, y que al ya no existir efectos positivos del contenido de humedad en el suelo sobre las plantas, está por demás la continuidad en las mediciones de este parámetro.

Finalmente, resulta importante señalar que puesto que en este trabajo solo se analizaron las capas de 0-15 cm y de 15 a 30 cm, observándose un buen nivel de humedad atribuido en gran medida a la precipitación ocurrida durante el ciclo del cultivo, no se descarta la posibilidad de aportaciones de agua en el sentido vertical de las capas del suelo más profundas, la cual no fue posible medir por falta de equipo.

6.5. PORCENTAJE DE LUZ INTERCEPTADA (% LI)

En el cuadro 8, se presentan los valores de porcentaje de luz interceptada calculados para un total de 11 fechas de registro que comprenden del 3 de julio al 14 de septiembre de 2006. Y, como puede observarse, el tratamiento C fue el que presentó los valores más altos en la mayoría de las fechas, seguido de los tratamientos B, D y, finalmente, el tratamiento A. Lo anterior coincide con el comportamiento del contenido de humedad en el suelo, que en general, presentó los valores más altos en los mismos tratamientos (B y C), lo que lleva a deducir que el contenido de humedad tuvo algo que ver con el hecho de que en los tratamientos B y C presentaran mayor cantidad de área foliar y en consecuencia el % de LI fuera mayor. Sin embargo, dicho efecto no resultó suficiente para provocar en ellos diferencias estadísticamente significativas ($\alpha= 0.05$) más que en un sola fecha, la del día 27 de Julio, siendo los tratamientos C y D los que son diferentes entre si, pero similares a los tratamientos A y B, de acuerdo con la prueba de Tukey.

Cuadro 8. Porcentaje de Luz interceptada por el cultivo de maíz. Montecillo, Méx.2006.

Fecha	Tratamientos							
	A		B		C		D	
03/07/2006	12.29	a	12.73	a	13.09	a	12.56	a
10/07/2006	15.19	a	15.90	a	15.94	a	15.70	a
17/07/2006	16.94	a	18.71	a	18.64	a	17.05	a
27/07/2006	24.65	ab	24.06	ab	27.21	a	22.06	b
03/08/2006	32.26	a	34.33	a	35.78	a	32.60	a
10/08/2006	57.83	a	55.88	a	59.84	a	59.75	a
17/08/2006	69.26	a	71.72	a	72.50	a	70.83	a
24/08/2006	75.44	a	76.43	a	76.41	a	75.40	a
31/08/2006	81.40	a	80.45	a	81.98	a	79.02	a
07/09/2006	89.37	a	89.88	a	90.67	a	89.50	a
14/09/2006	90.46	a	90.77	a	91.35	a	89.93	a

La gráfica correspondiente a los valores presentados en el cuadro 8, se observan en la Figura 29. En ella, el comportamiento entre tratamientos no alcanza a diferenciarse, dado que transcurren a la par unos con otros, y es solo en la fecha en la que se presentaron las diferencias estadísticas, previamente mencionadas, en donde se alcanza a percibir un poco como el tratamiento D se encuentra por debajo de los demás tratamientos. En cuanto a la forma en como se van delineando las curvas, éstas presentan un incremento gradual normal hasta llegar a un valor constante de $\pm 90\%$ de LI.

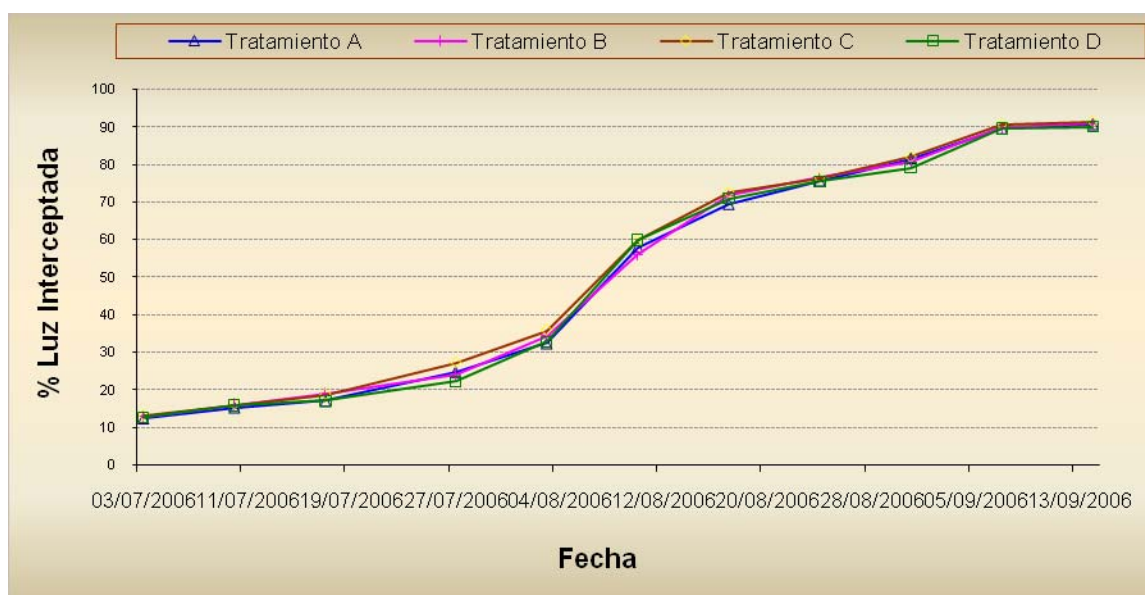


Figura 29. Porcentaje de luz Interceptada por el cultivo de maíz, Montecillo. Mex. 2006.

6.6. RENDIMIENTO DE GRANO

El objetivo principal del implemento de cualquier técnica en el sector agronómico, además del mejoramiento en la calidad de los cultivos, es el incremento en sus rendimientos, así, al término del ciclo del cultivo de estudio, se determinó el rendimiento de grano a partir de su cosecha en la parcela útil de cada tratamiento (apartado 4.4.4.). En el cuadro 9 se muestran los rendimientos obtenidos por tratamiento por bloque, así como el rendimiento calculado en toneladas por hectárea para cada tratamiento, siendo el tratamiento B quien presentó los rendimientos más altos con 5.76 ton ha⁻¹, seguido del tratamiento C, el D y finalmente el A con 5.58, 5.53 y 5.3 ton ha⁻¹ respectivamente. Cabe destacar que los rendimientos obtenidos en el presente experimento se encuentran dentro del rango especificado por el proveedor que va de 4 a 8 ton ha⁻¹ (Chapingo, 2004). Y siendo recomendada esta variedad tanto para riego como para temporal, un rendimiento promedio de 5.3 ton ha⁻¹ (Testigo), puede considerarse muy bueno, dado que SAGARPA (2007) reporta que bajo condiciones de temporal, el rendimiento ponderado promedio a nivel nacional para el periodo 1996-2006 fue equivalente a 2.654 ton ha⁻¹.

Cuadro 9. Rendimiento de grano (Kg/parcela útil) obtenido para cada tratamiento.

TRAT	BLOQUE				Rendimiento promedio (Kg parcela útil ⁻¹)	Rendimiento (ton ha ⁻¹)
	I	II	III	IV		
A	6.62	8.45	4.10	5.51	5.98	5.53
	6.71	7.24	3.91	5.26		
B	4.95	6.59	5.07	5.65	6.23	5.76
	6.87	7.99	5.61	7.09		
C	5.59	8.53	3.84	5.26	6.04	5.58
	7.61	8.61	2.87	5.99		
D	4.05	7.08	2.75	5.49	5.73	5.30
	6.73	7.23	6.04	6.47		

El análisis de varianza realizado a los valores de rendimiento de grano obtenidos por parcela útil (cuadro 10), muestran que no hubo diferencias significativas estadísticamente ($\alpha = 0.05$), y esto se explica a partir del hecho de que las lluvias se distribuyeron de manera mas o menos uniforme a lo largo de todo el ciclo del cultivo, evitando así un estrés hídrico que se tradujera en diferencias entre rendimientos afectados por los tratamientos probados.

En la Figura 30 se observa que los bloques I y II presentan rendimientos superiores a los bloques III Y IV, diferencias que resultan ser estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) de acuerdo con el cuadro 10. En base a lo anterior, se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey a los valores obtenidos por bloque y se encontró que las diferencias estadísticamente significativas se presentan al comparar los bloques I vs II y III, además de II vs III y IV, siendo similares únicamente los bloques I y IV. Lo anterior justifica en gran medida la selección del diseño experimental de Bloques completos con tratamientos aleatorizados.

Cuadro 10. Resultados del ANVA realizado a los valores de Rendimiento de grano (presentados en el cuadro 9).

FV	GL	SC	CM	F_{CAL}	F_{TAB} ($\alpha = 0.05$)
BLOQUE	3	23.86596250	7.95532083	16.05	3.863
TRAT	3	0.50585000	0.16861667	0.34	3.863
EE	9	4.46058750	0.49562083		
EM*	16	17.06620000	1.06663750		
TOTAL	31	74.73100000			

*EM = Error Muestral debido al submuestreo, Alvarado (1996).

PRUEBA DE TUKEY ($\alpha = 0.05$)		Medias	Trat
	a	6.23	B
	a	6.04	C
	a	5.98	A
	a	5.73	D

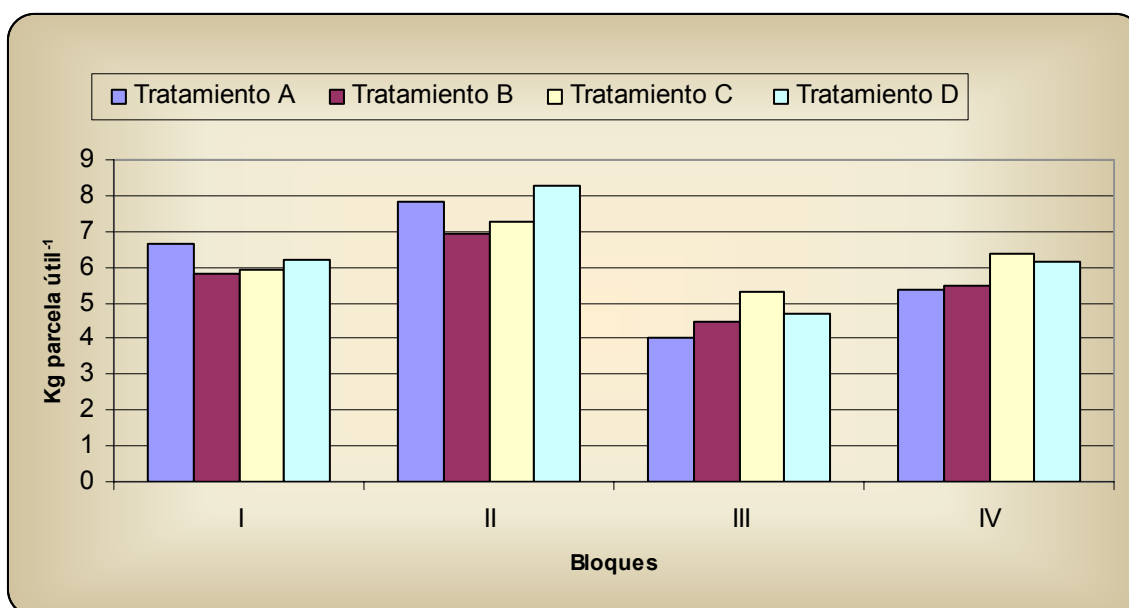


Figura 30. Rendimiento de grano (Kg parcela útil⁻¹) por tratamiento por bloque.

6.7. MATERIA SECA TOTAL Y SU PARTICIÓN

La materia seca, como se mencionó en el apartado 4.4.5., se obtuvo de un total de 24 plantas por tratamiento seleccionadas poco después de su emergencia y colectadas al término del ciclo del cultivo. En el cuadro 11 se presentan los valores promedio de materia seca de las plantas mencionadas, distribuidos de manera correspondiente a cada una de las partes que conforman la planta de maíz. De este modo, el tratamiento que presentó mayor acumulación de materia seca total fue el tratamiento C, seguido de los tratamientos B, A y finalmente el tratamiento D (Testigo) con 334.83, 330.02, 328.56 y 296.29 g respectivamente.

Estos resultados coinciden en su comportamiento con los obtenidos en el porcentaje de Luz Interceptada, la cual se infiere que tuvo que influir en el desarrollo del dosel, cuya acumulación de materia seca se encuentra por encima de las demás partes que constituyen a la planta de maíz. Lo anterior contrasta con el hecho de que de acuerdo con Waldren (1988), aproximadamente el 45% de la materia seca total superficial se encuentra en el grano, siendo menor la acumulación de materia seca en las demás partes de la planta, puesto que de parte de ellas fue translocada al fruto. La lámina de agua precipitada en la etapa vegetativa forma parte de la explicación de este hecho, ya que a ella le

corresponde el 42.19 % del total, siendo solo el 24.18 % la ocurrida en la etapa de llenado del grano (Cuadro 5), aunado al hecho de que la variedad de la semilla utilizada ha sido recomendada tanto para producción de grano como de forraje (Chapingo, 2004).

Cuadro 11. Distribución de la materia seca por planta de maíz en los tratamientos de estudio.

Factor	Tratamiento											
	A		B		C		D					
	MS	%	MS	%	MS	%	MS	%				
Hoja	104.88	31.92	a	103.08	31.24	a	106.29	31.74	a	101.83	34.37	a
Espiga	5.65	1.72	a	5.54	1.68	a	5.96	1.78	a	5.58	1.88	a
Tallo	92.88	28.27	a	85.94	26.04	a	96.50	28.82	a	73.75	24.89	a
Breáceas ó Totomoxtle	23.88	7.27	a	24.42	7.40	a	27.33	8.16	a	22.71	7.66	a
Grano	84.71	25.78	a	93.54	28.34	a	83.38	24.90	a	78.25	26.41	a
Olote	16.58	5.05	a	17.50	5.30	a	15.38	4.59	a	14.17	4.78	a
Total	328.56	100		330.02	100.00		334.83	100.00		296.29	100.00	

MS = Materia seca, g.

Medias con distinta letra en la misma fila son diferentes (Tukey, 0.05)

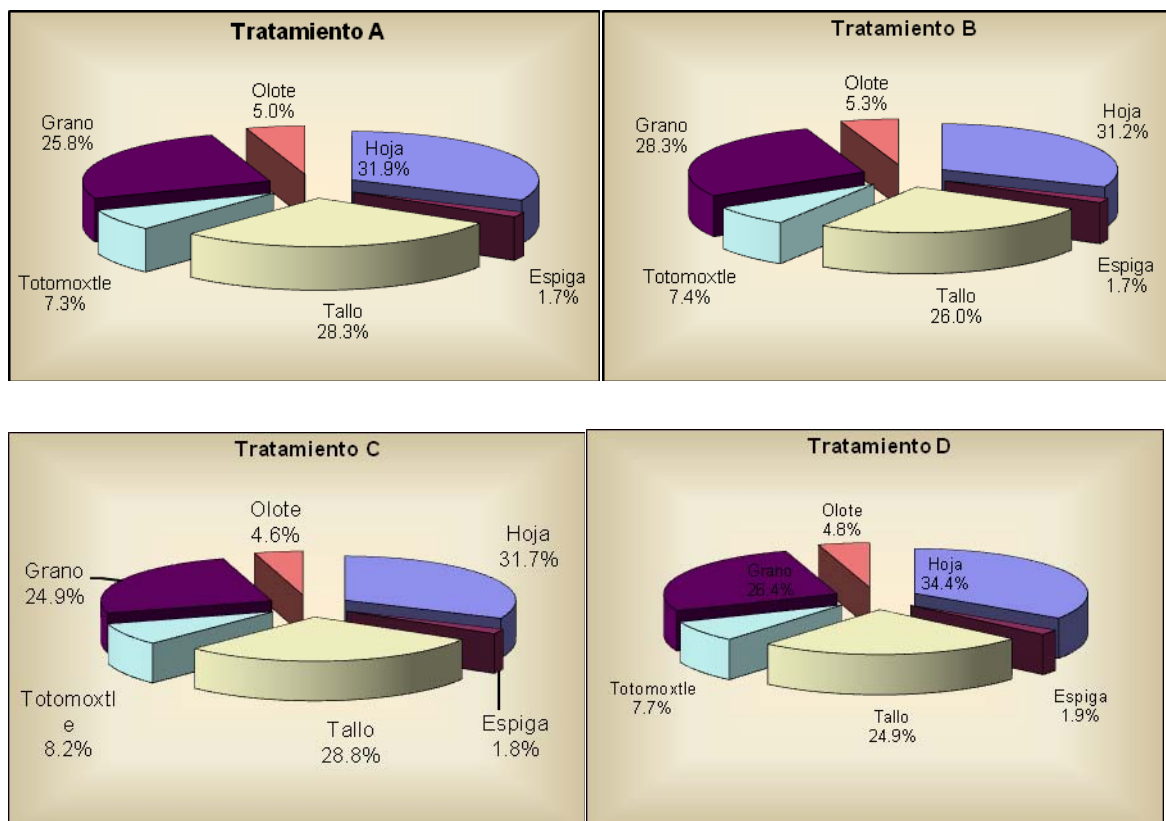


Figura 31. Distribución de la materia seca en porcentaje por planta en cada tratamiento.

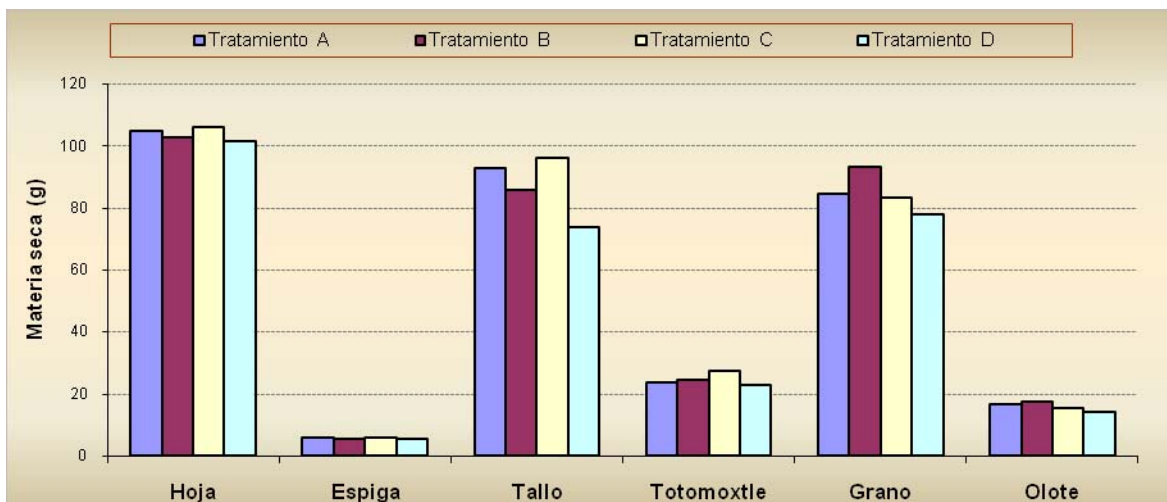


Figura 32. Comparación entre tratamientos de la distribución de la materia seca (g).

El ANVA realizado a los valores de materia seca mostrados en el cuadro 11, así como la prueba de comparación de medias de Tukey, mostraron que no existieron en ningún caso diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$). Las figuras 31 y 32, mediante gráficas de pastel y barras separan los porcentajes de materia seca de cada planta de los tratamientos probados, y es en ellas que se puede apreciar claramente la similitud entre tratamientos antes mencionada.

6.8. ANÁLISIS DE ALGUNOS FACTORES FISIOTÉCNICOS

Con el fin de evaluar la respuesta del cultivo de maíz a las diferentes formas de microcuencas se consideró el estudio de algunos factores fisiotécnicos del cultivo, esto de manera periódica. Dichos factores fueron: altura, número de hojas y diámetro del tallo. Los valores presentados en los cuadros 12, 13 y 14 son el resultado del promedio de 24 plantas por tratamiento, seleccionadas desde la emergencia y debidamente identificadas para el registro periódico de los factores que a continuación se mencionan.

6.8.1. Altura

De la variable altura se obtuvieron un total de 11 fechas de registro que comienzan el día 16 de junio y concluyen el 22 de septiembre de 2006.

La variedad de maíz utilizada en este trabajo de investigación se considera de porte alto, puesto que la altura promedio final de las plantas en todos los tratamientos se encontró por encima de los 2 m, como puede apreciarse en el cuadro 12, donde se observa también que, aunque no existieron diferencias estadísticamente significativas (Tukey, 0.05), la altura al igual que el % LI y el rendimiento tuvieron la misma tendencia en cuanto al orden de los valores correspondientes a cada tratamiento, siendo las alturas finales de los tratamientos C y B los que se encuentran sobre las alturas de los tratamientos D y A. La gráfica de la Figura 33 corresponde a los valores presentados en el cuadro 12.

Cuadro 12. Datos de altura promedio (cm) de las plantas seleccionadas por tratamiento.

Fecha	BLOQUE							
	A		B		C		D	
16/06/06	9.46	a	10.21	a	10.85	a	10.10	a
23/06/06	12.55	a	13.68	a	13.83	a	12.92	a
30/06/06	14.58	a	15.95	a	16.13	a	15.13	a
07/07/06	17.42	a	19.17	a	19.88	a	18.50	a
14/07/06	24.13	a	25.00	a	26.88	a	24.71	a
21/07/06	28.75	a	30.63	a	31.00	a	28.25	a
28/07/06	37.67	a	39.21	a	39.21	a	39.17	a
04/08/06	54.92	a	56.83	a	57.38	a	55.67	a
11/08/06	73.72	a	75.50	a	75.77	a	74.68	a
18/08/06	101.88	a	103.38	a	103.17	a	102.71	a
25/08/06	122.42	a	123.42	a	123.17	a	122.08	a
01/09/06	151.63	a	154.42	a	154.71	a	153.96	a
08/09/06	180.77	a	185.88	a	183.08	a	181.00	a
15/09/06	204.96	a	214.19	a	219.75	a	208.25	a
22/09/06	213.08	a	220.90	a	223.00	a	209.63	a

Medias con distinta letra en la misma fila son diferentes (Tukey, 0.05)

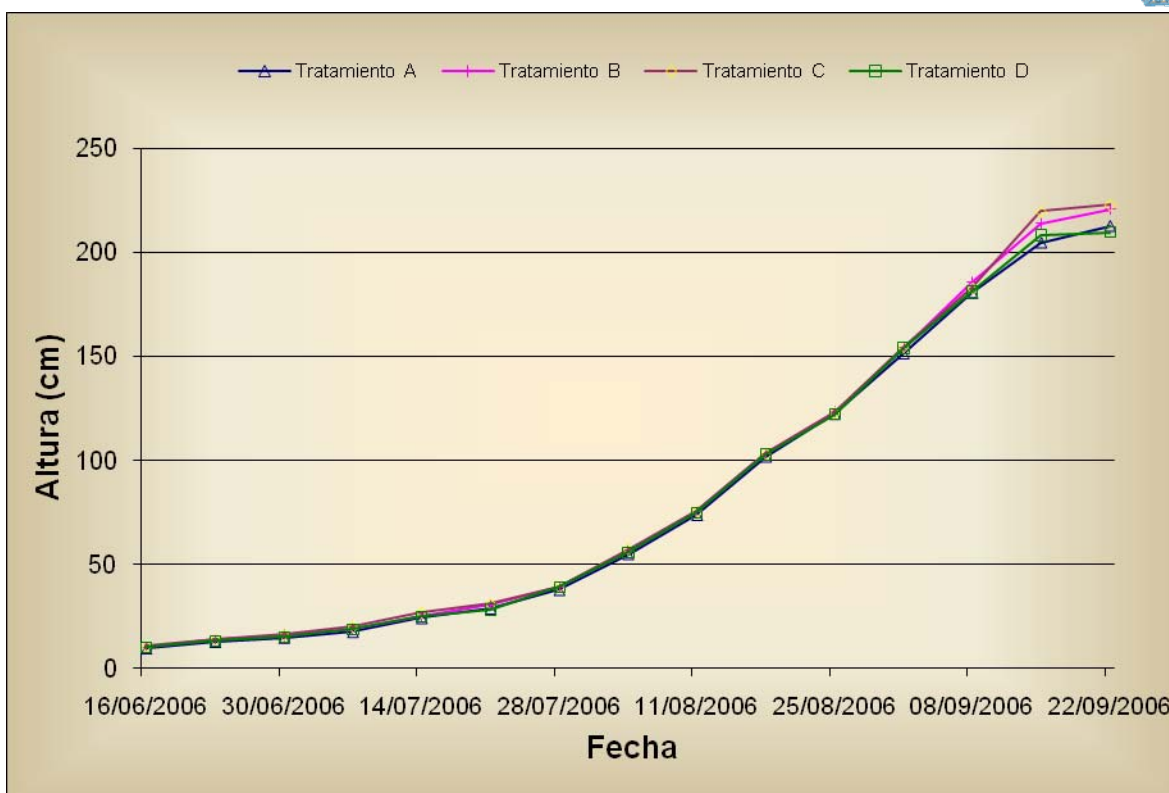


Figura 33. Evolución de la variable altura a lo largo de la etapa vegetativa en los tratamientos de estudio.

6.8.2. No. de Hojas

El número de hojas final de las plantas de maíz de la variedad San Josecito se sitúa en el presente experimento entre 13 y 15, las cuales se presume contribuyeron a que esta variable constituyera el mayor porcentaje (sobre 30 %) de acumulación de materia seca.

De la prueba de comparación de medias de Tukey, $\alpha=0.05$, (mostrada en el cuadro 13), se concluye que no existieron diferencias significativas entre el número de hojas de las plantas pertenecientes a cada tratamiento.

Cuadro 13. Valores promedio del número de hojas del cultivo de maíz en los diferentes tratamientos.

Fecha	BLOQUE							
	A		B		C		D	
16/06/06	3.85	a	3.96	a	3.92	a	3.82	a
23/06/06	4.40	a	4.44	a	4.47	a	4.20	a
30/06/06	5.17	a	5.20	a	5.22	a	4.89	a

07/07/06	5.94	a	5.96	a	5.98	a	5.58	a
14/07/06	7.29	a	7.42	a	7.54	a	7.33	a
21/07/06	8.31	a	8.38	a	8.38	a	8.18	a
28/07/06	9.79	a	10.00	a	9.83	a	9.67	a
04/08/06	11.58	a	11.67	a	11.96	a	11.58	a
11/08/06	12.04	a	12.31	a	12.50	a	12.18	a
18/08/06	12.50	a	12.75	a	13.06	a	12.63	a
25/08/06	13.58	a	13.71	a	13.94	a	13.46	a
01/09/06	13.71	a	14.04	a	14.33	a	14.13	a
08/09/06	13.58	a	14.00	a	14.40	a	14.08	a
15/09/06	13.88	a	14.21	a	14.63	a	14.38	a
22/09/06	13.96	a	14.17	a	14.67	a	13.92	a

Medias con distinta letra en la misma fila son diferentes (Tukey, 0.05)

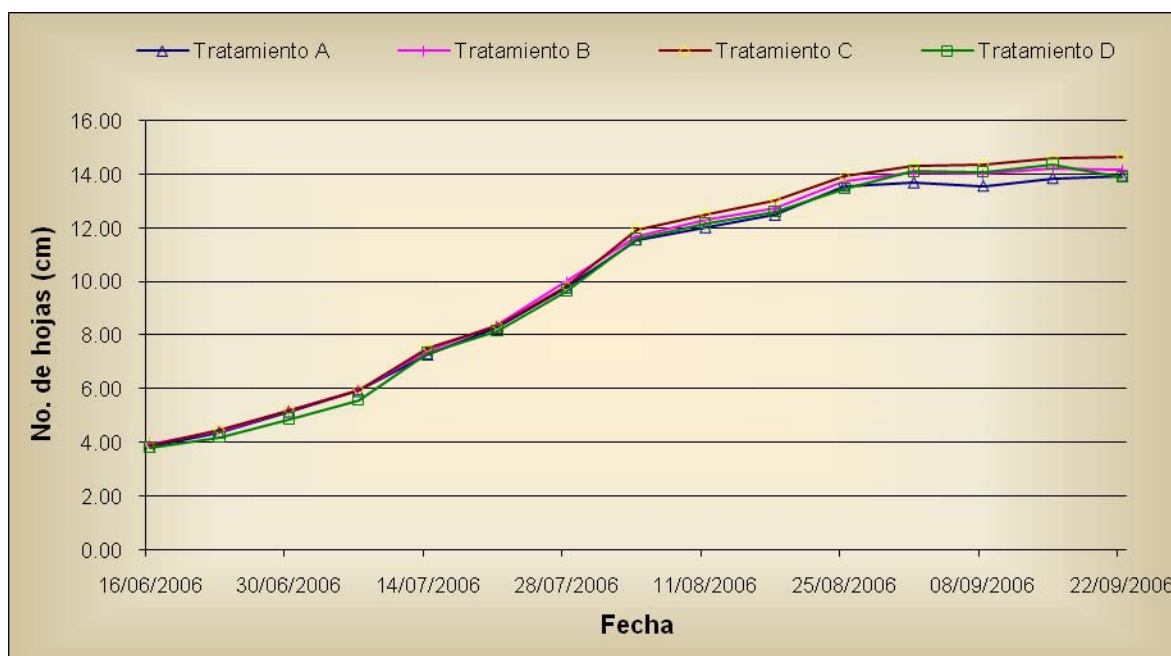


Figura 34. Número de hojas por tratamiento a lo largo de la etapa vegetativa.

6.8.3. Diámetro

El comportamiento del diámetro del tallo fue similar al de la altura y el número de hojas, no existiendo diferencias significativas entre tratamientos (Tukey, 0.05), y siendo los tratamientos C y B quienes nuevamente presentan los diámetros mayores, esto se muestra en el cuadro 14 y la Figura 35.

Cuadro 14. Valores promedio de diámetro del tallo (cm), correspondientes a cada tratamiento.

Fecha	BLOQUE			
	A	B	C	D
23/06/06	0.90 a	0.94 a	0.97 a	0.89 a
30/06/06	1.24 a	1.27 a	1.32 a	1.20 a
07/07/06	1.59 a	1.53 a	1.66 a	1.50 a
14/07/06	2.12 a	2.15 a	2.23 a	2.10 a
21/07/06	2.42 a	2.51 a	2.63 a	2.49 a
28/07/06	2.83 a	2.91 a	2.90 a	2.78 a
04/08/06	3.23 a	3.25 a	3.38 a	3.23 a
11/08/06	3.28 a	3.30 a	3.39 a	3.24 a
18/08/06	3.34 a	3.36 a	3.40 a	3.27 a
25/08/06	3.38 a	3.40 a	3.41 a	3.29 a
01/09/06	3.40 a	3.42 a	3.43 a	3.34 a
08/09/06	3.42 a	3.43 a	3.44 a	3.37 a
15/09/06	3.51 a	3.52 a	3.53 a	3.40 a
22/09/06	3.53 a	3.56 a	3.57 a	3.41 a

Medias con distinta letra en la misma fila son diferentes (Tukey, 0.05)

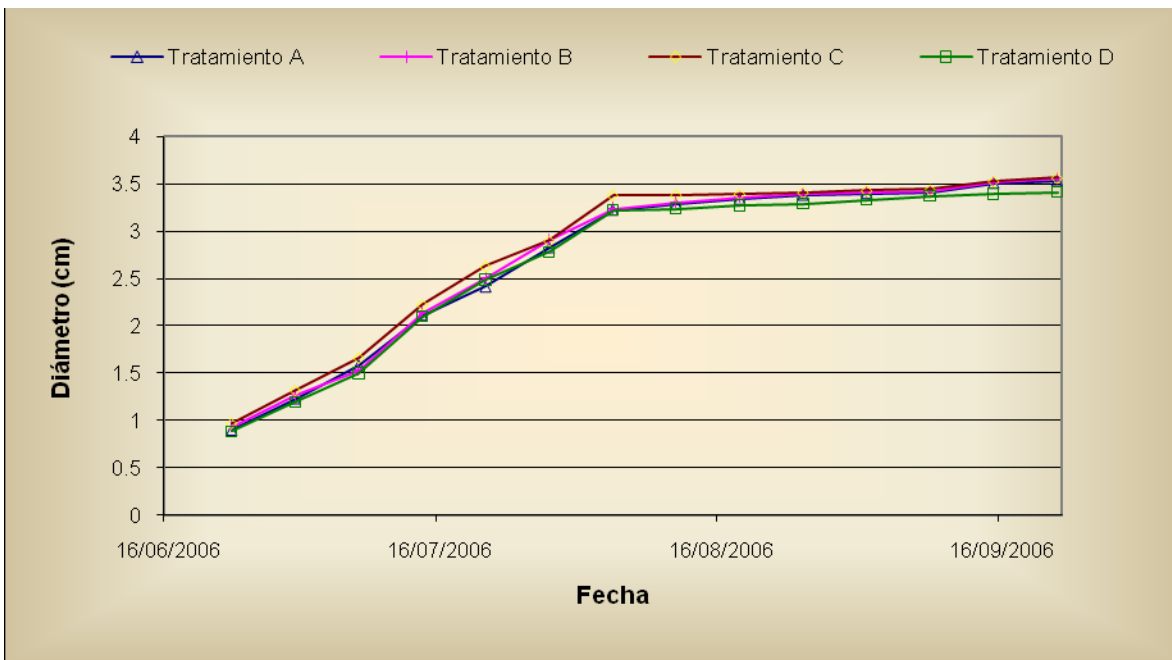


Figura 35. Evolución del comportamiento de la variable diámetro del tallo por tratamiento.

6.9. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN FOLIAR (K)

El cálculo del Coeficiente de Absorción foliar (K) se realizó una sola vez por tratamiento, debido a que la metodología para la obtención de los datos implica la destrucción de las plantas que se encuentren dentro de una superficie determinada (1 m² en este caso).

El valor de K correspondiente al tratamiento A, de acuerdo con el cuadro 15, fue de 0.3889 y, coincide con el valor promedio de K obtenido para el cultivo de maíz de la variedad Obregón ($K = 0.39$), del experimento realizado en la estación experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, cuyo objetivo fue estudiar el comportamiento de nueve cultivares de maíz en relación con el IAF y el coeficiente de absorción de luz (Camacho *et al.*, 1995). En el tratamiento B, el valor de K resultó ser de 0.3114 (menor en comparación con el obtenido para el tratamiento A, $K = 0.3889$). El K correspondiente a los tratamientos C y D fue de 0.424 y 0.2722 respectivamente.

Los valores de K obtenidos en los tratamientos A, B y C coinciden con lo mencionado por Coombs *et al.* (1988), que en la mayoría de los doseles foliares el coeficiente de absorción foliar varía de 0.3 a 1.3 y, que en los doseles en los cuales las hojas son casi verticales, la luz penetra con facilidad hasta los estratos inferiores, es por ello que el valor de la K con frecuencia es bajo, típicamente de 0.4 para las gramíneas, (Coombs *et al.*, 1988).

Cuadro 15. Valores de los coeficientes de absorción Foliar determinados por tratamiento.

TRATAMIENTO	ECUACIÓN OBTENIDA	R ²	K
A	$y = 0.3889x + 0.0231$	0.9312	0.3889
B	$y = 0.3114x + 0.4223$	0.8367	0.3114
C	$y = 0.424x + 0.852$	0.8793	0.424
D	$y = 0.2722x + 0.318$	0.8528	0.2722

La metodología empleada en la obtención de los valores graficados de la Figura 36, se presentan en los cuadros A14, A15, A16 y A17, en el apartado de Anexos.

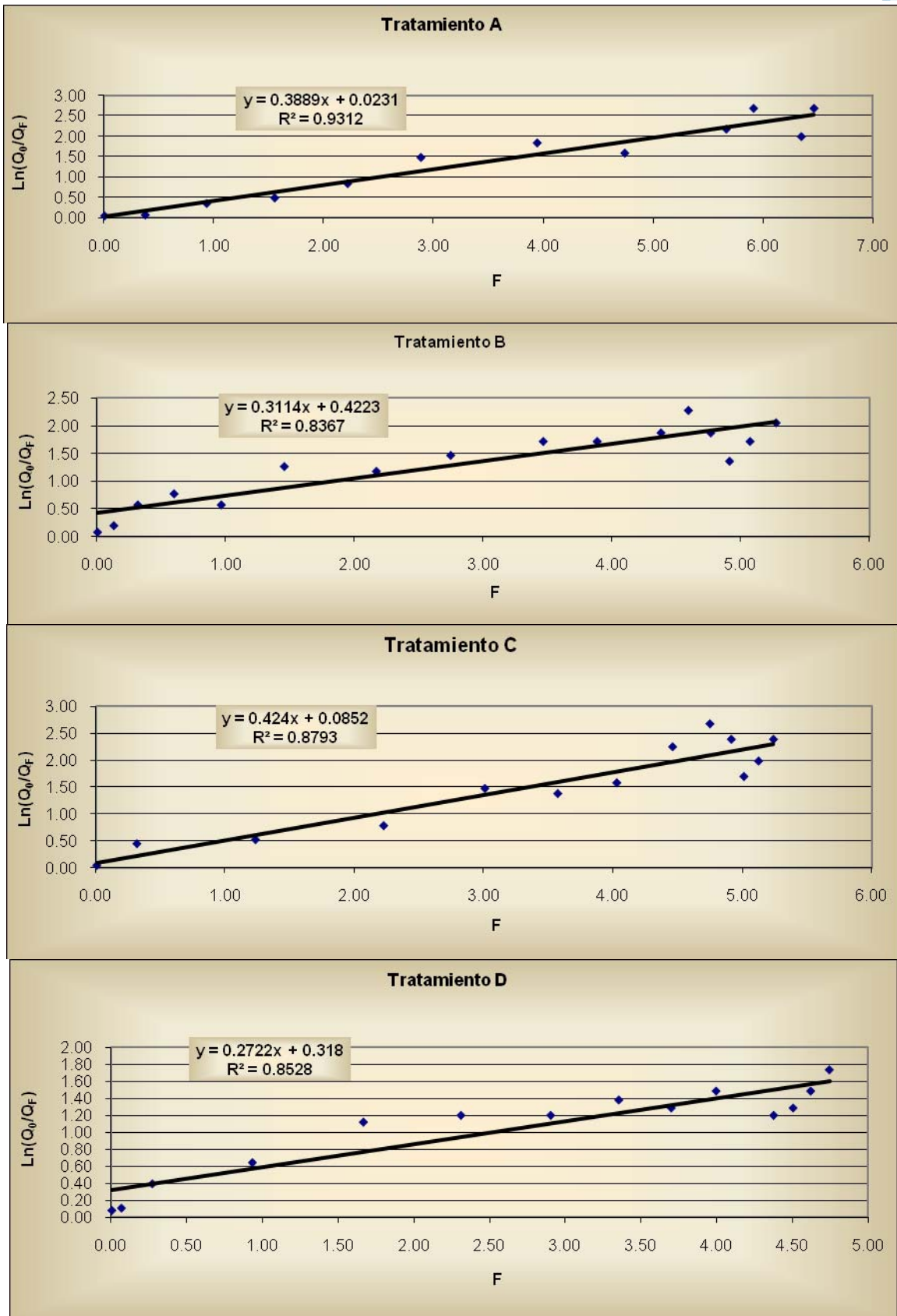


Figura 36. Gráficas utilizadas en la obtención de K para cada tratamiento.

6.10. Explicación de los rendimientos obtenidos utilizando la metodología propuesta por la FAO (2000).

Como se menciona en el apartado 5.5.2, de acuerdo con la metodología propuesta por la FAO (2000), se dará una explicación a los rendimientos obtenidos, a través de la determinación de los valores correspondientes a cada variable de la siguiente fórmula:

$$Y = Y_{m\acute{a}x} * F * K_{hidr} * K_{sal}$$

Donde:

$Y_{m\acute{a}x}$ = Rendimiento potencial máximo o agroclimático económicamente aprovechable que puede producir cultivo sano con un suministro adecuado de nutrientes y agua, en $kg\ ha^{-1}$.

F = Factor de restricción del rendimiento por deficiencia de nutrición (Índice integral de Fertilidad), adimensional (varía entre 0 y 1).

K_{hidr} = Factor de restricción del rendimiento por deficiencia de suministro de agua, adimensional (varía entre 0 y 1).

K_{sal} = Factor de restricción del rendimiento por salinidad del suelo, adimensional (varía entre 0 y 1).

Dichos resultados se presentan en el Cuadro 16, a partir del cual se deduce que las variables que afectaron de manera más significativa el rendimiento del cultivo de maíz fueron la disponibilidad de agua y la salinidad presente en el suelo donde se estableció el trabajo de investigación.

Cuadro 16. Valores obtenidos para cada variable considerada de influencia en el rendimiento del cultivo (Y).

Trat	Y_{real} ($ton\ ha^{-1}$)		$Y_{m\acute{a}x}$ ($ton\ ha^{-1}$)		K_{hidr} (Adim.)		K_{sal} (Adim.)		F (Adim.)		Y_{calc} ($ton\ ha^{-1}$)	
	B I-III	B II-IV	B I-III	B II-IV	B I-III	B II-IV	B I-III	B II-IV	B I-III	B II-IV	B I-III	B II-IV
A	4.89	6.06	8	8	0.71	0.68	0.61	0.56	0.74	1.00	2.56	3.04
B	5.16	6.26	8	8	0.76	0.76	0.61	0.56	0.74	0.95	2.74	3.23
C	4.56	6.51	8	8	0.75	0.77	0.61	0.56	0.68	0.95	2.49	3.28
D	4.48	6.02	8	8	0.71	0.71	0.61	0.56	0.68	1.00	2.36	3.18

Nota: B I-III = Bloques I y III; B II-IV = Bloques II y IV. El valor F representa el índice integral de fertilidad en forma relativa y adimensional entre los tratamientos experimentales. El valor de K_{sal} se obtuvo a partir de escasa información de CE.

En el mismo cuadro (Cuadro 16), se observa la clara diferencia en cuanto a rendimiento por agrupación de bloques, así por ejemplo, el mayor rendimiento obtenido corresponde al tratamiento C de los Bloques II y IV (6.51 ton ha⁻¹), y esto, a simple vista puede explicarse debido a que en este tratamiento se presentó el valor más alto de K_{hidr} , que se cree ayudó a reducir los efectos de la salinidad alta, $K_{sal} = 0.56$, aunado a la buena fertilidad del suelo ($F = 1.0$).

Y, el menor rendimiento se tuvo en el tratamiento D, de los bloques I y III, donde se observó más baja fertilidad ($F = 0.68$) y baja humedad ($K_{hidr} = 0.71$), con menor afectación por parte de la salinidad en comparación con el tratamiento C ($K_{sal} = 0.61$).

De este modo, y con el fin de justificar la dependencia de los rendimientos de maíz obtenidos en campo (Y_{real}) en función solamente de los tratamientos de captación de agua de lluvia o de la humedad del suelo, en el Cuadro 17 se muestran los rendimientos calculados con la metodología descrita anteriormente (Y_{calc}). Los valores absolutos de Y_{calc} no tienen importancia debido a la toma del valor $Y_{max} = 8$ ton ha⁻¹ lo que no corresponde directamente al valor máximo potencial biológicamente. La importancia la tienen los valores relativos ($Y_{calc}/8$) y su cambio en función del tratamiento. En la Figura 37 se presenta la gráfica de comparación de los valores relativos del rendimiento, generada a partir de los datos mostrados en el cuadro 17 ($Y_{real}/6.51$), donde 6.51 ton ha⁻¹ es el valor máximo real observado y calculado es 3.28 ton ha⁻¹ corresponde al valor máximo calculado ($Y_{calc}/8$).

Cuadro 17. Valores relativos de rendimiento para los diferentes bloques, así como su correspondiente K_{hidr} .

$Y_{real}/6.51$ (adim)		$Y_{calc}/8$ (adim)		K_{hidr} (Adim.)	
B I-III	B II- IV	B I-III	B II- IV	B I-III	B II- IV
0.752	0.932	0.780	0.927	0.71	0.68
0.793	0.962	0.835	0.985	0.76	0.76
0.701	1.000	0.759	1.000	0.75	0.77
0.689	0.925	0.720	0.970	0.71	0.71

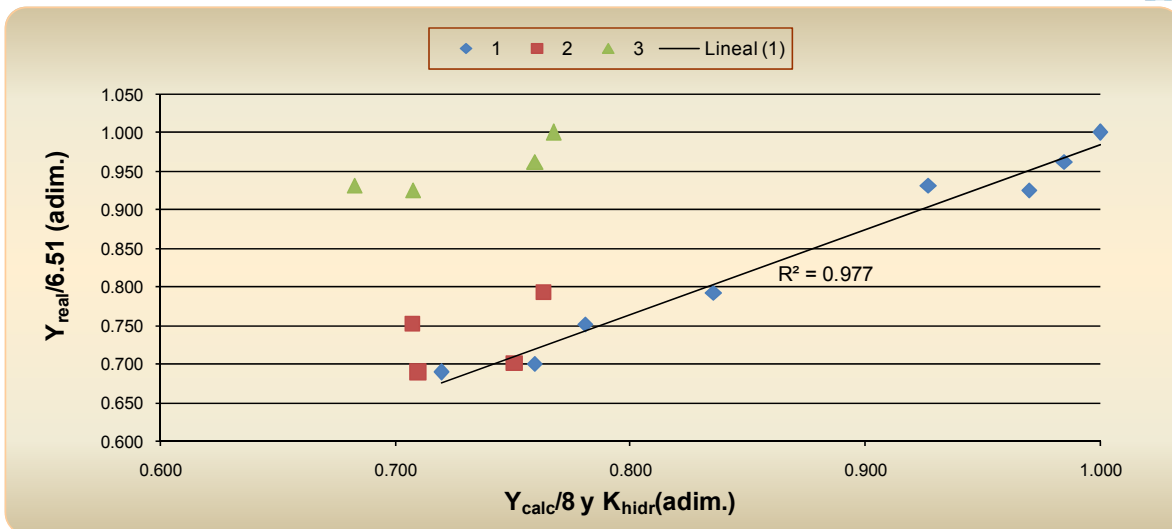


Figura 37. Comparación de los rendimientos adimensionales de maíz obtenidos ($Y_{real}/6.51$) en diferentes tratamientos de captación de lluvia con los valores calculados ($Y_{calc}/8$) (1) y con los coeficientes hídricos K_{hidr} en el grupo de tratamientos B I-III (2) y en el grupo de tratamientos B II- IV (3).

Como se ve en la figura anterior, existe buena concordancia entre los valores adimensionales de rendimiento calculados y medidos. El coeficiente de determinación entre ellos es 0.977. Esto significa que la cierta regularidad en dependencia de los rendimientos observados de maíz en función del tipo de tratamiento de captación de lluvia puede explicar la razón de cambio del régimen hídrico del suelo. Por lo general, los valores adimensionales calculados ($Y_{calc}/8$) superan un poco (dentro de 20 %) los valores observados ($Y_{real}/6.51$) lo que significa que existe una pequeña sobreestimación sistemática de los coeficientes K_{hidr} o K_{sal} o F . Pero estas sobreestimaciones potenciales no tienen gran importancia para entender cierta regularidad en la distribución de los rendimientos entre los tratamientos. Para precisar dependencia de los rendimientos en función del tipo de tratamiento, en la Figura 37 se presentan también los valores K_{hidr} dependientes directamente del tipo de tratamiento. Los valores K_{hidr} se pueden considerar también como la fracción de los rendimientos relativos ($Y_{calc}/8$) o ($Y_{real}/6.51$) relacionada solamente con el régimen hídrico o con el tipo de tratamiento.

Continuando con la misma figura (figura 37), los coeficientes K_{hidr} tienen mayor concordancia con los rendimientos observados ($Y_{real}/6.51$) dentro del grupo de tratamientos B I-III en comparación con el grupo B II- IV. Esto significa que el efecto directo del grupo B I-III sobre los rendimientos de maíz es mayor que del grupo B II- IV.

Además, como ya se ha mencionado anteriormente, la humedad del suelo se ha medido en los estratos de 0-15 y 15 -30 cm de profundidad. Se sabe que las raíces de maíz absorben agua en el estrato hasta 1 m o más de profundidad. La humedad de los estratos inferiores de 30 cm debería ser más grande que en estrato de 0 a 30 cm. Entonces los rendimientos relativamente altos obtenidos en los tratamientos posiblemente se pueden explicar por aportación del régimen hídrico del cultivo de parte de los estratos inferiores de 30 cm. Sin embargo, la distribución observada de los rendimientos en función de tipo de tratamiento parece que se puede explicar por la diferencia entre la cantidad de agua en el estrato de 30 cm de profundidad mientras que la cantidad de agua en los estratos inferiores debería ser casi igual en todos los tratamientos. Además es necesario considerar mayor importancia de la humedad en el estrato superior de 30 cm de profundidad debido a la mayor concentración de las raíces en este estrato, mayor aireación y mayor fertilidad que en los estratos más profundos.

7. CONCLUSIONES

Del Contenido de Humedad en el suelo:

- Entre las dos profundidades de estudio, a 15 y 30 centímetros, existió una diferencia de contenido de humedad constante, la cual ya transformada a lámina fluctúa entre los 3 y los 4 centímetros a lo largo de todo el ciclo del cultivo, atribuible al tipo de suelo (franco arcillo arenoso).
- A 15 centímetros de profundidad, la lámina aprovechable descendió más allá de PMP en reiteradas ocasiones a lo largo de todo el ciclo del cultivo, siendo en la etapa de floración más evidente este hecho (en 14 de 18 fechas se presentaron láminas por debajo de PMP). Cabe señalar también que no ocurrió lo mismo a la profundidad de 30 centímetros, puesto que los valores de lámina calculados en base al contenido de humedad en el suelo a dicha profundidad se encontraron en aproximadamente el 90% del tiempo dentro del rango considerado como aprovechable (incluso algunas fechas estuvieron por encima de CC).
- Los tratamientos probados no provocaron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de humedad en el suelo en la gran mayoría de las fechas de registro.
- Las fechas en las que si se presentaron diferencias correspondieron a los días subsecuentes a precipitaciones superiores a los 10 mm aproximadamente, lo cual puede deberse a la distancia entre contras (3 m) y el tipo de suelo (franco-arcillo-arenoso).
- Dado que no se realizaron mediciones de contenido de humedad a profundidades mayores de 30 cm (por falta de equipo), no se descarta la posibilidad de aportaciones en el sentido vertical provenientes del manto acuífero.

Del Rendimiento de grano

En lo que respecta al rendimiento de grano, el tratamiento B fue el que presentó los rendimientos más altos con 5.76 ton ha⁻¹, seguido del tratamiento C, el D y

finalmente el A con 5.58, 5.53 y 5.3 ton ha⁻¹ respectivamente. No existiendo diferencias significativas entre tratamientos (Tukey, 0.05).

De la materia seca total y su partición.

El tratamiento que presentó mayor acumulación de materia seca total fue el tratamiento C, seguido de los tratamientos B, A y finalmente el tratamiento D (Testigo) con 334.83, 330.02, 328.56 y 296.29 g respectivamente. En este caso, al igual que en el rendimiento de grano, no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, tanto en materia seca total como en la partición correspondiente a las plantas consideradas, (Tukey, 0.05).

Del Análisis de algunas variables fisiotécnicas.

Respecto a las variables altura, número de hojas y diámetro del tallo, medidas en plantas específicas a las que se les llevó registro, no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos. Resultado finalmente estaturas promedio superiores a los 2.0 m en todos los tratamientos, número de hojas entre 13 y 15 y diámetro del tallo de hasta 3.57 cm.

Del Coeficiente de Absorción Foliar

Los valores de K obtenidos en los tratamientos A, B, C y D fueron de 0.3889, 0.3114, 0.424 y 0.2722, respectivamente. De ellos, los tratamientos A, B, y C estuvieron dentro del rango de 0.3 a 1.3, Coombs *et al*, (1988).

Del porcentaje de luz Interceptada:

El comportamiento del porcentaje de Luz interceptada fue similar al del contenido de humedad, el tratamiento C fue el que presentó en la mayoría de las fechas de registro los porcentajes mayores, seguido de los tratamientos B, A y D, los cuales fueron de 91.35, 90.77, 90.46 y 89.93 % respectivamente, calculados para el día 14 de septiembre de 2006 (última fecha de toma de datos para el cálculo de ésta variable). No existieron diferencias significativas entre tratamientos en más del 90% de las fechas de registro.

De la explicación de los rendimientos obtenidos.

En este sentido se concluye que existe cierta regularidad en dependencia de los rendimientos observados de maíz en función del tipo de tratamiento de captación de lluvia, con lo cual puede explicar la razón de cambio del régimen hídrico del suelo. Y que el efecto directo del grupo conformado por los Bloques I-III sobre los rendimientos de maíz es mayor que el del grupo de los Bloques B II- IV.

8. RECOMENDACIONES

El empleo de este tipo de técnicas puede resultar difícil cuando se está acostumbrado al uso de maquinaria en la mayoría de las labores culturales. Sin embargo, aún y cuando no se tuvieron diferencias evidentes entre los tratamientos probados en el presente trabajo de investigación, si se considera que la implementación técnicas de captación *in situ* del agua de lluvia puede resultar ser una alternativa viable para aquellos lugares de difícil acceso, dónde no se dispone de agua para el riego, en cuyo caso la “arada parcial” puede ser una buena opción, dado que su configuración es más sencilla que la del surco tradicional y proporciona resultados similares.

En lo que se refiere al tipo de suelo, se debe observar que la textura sea lo menos arenosa posible, ya que si el agua se infiltra con rapidez, de poco o nada servirá la colocación de contras a lo largo del surco. Para fines de investigación, la colocación de pasillos facilita bastante el acceso para la toma de datos, así que éstos deben ser considerados al momento de establecer el experimento en campo.

En cuanto a la selección de la semilla, ésta debe corresponder a una variedad de ciclo corto que garantice en cierta medida que el aporte de agua adicional debido a la colocación de las microcuencas sea suficiente para complementar el abastecimiento del agua demandada por el cultivo, llevándolo a término de manera satisfactoria. Una variedad de porte más bajo al utilizado aquí, ayudaría también si se considera tomar datos de Radiación Fotosintéticamente Activa, sobre todo cuando las plantas alcanzan su máximo desarrollo, ya que al introducir escaleras, bancos, sillas, etc., se corre el riesgo de alterar la conformación de las microcuencas, por la misma razón, se recomienda que el control de malezas sea combatido con herbicidas y no de forma manual.

Otro aspecto que resulta interesante es probar esta tecnología en lugares con pendientes pronunciadas, dado que algunos autores mencionan un beneficio

adicional al almacenamiento de agua, y es el hecho de que el uso de microcuencas ayuda a evitar en cierta medida la erosión.

Finalmente, se recomienda probar distancias entre contras menores a los 3 metros, para así encontrar aquella que proporcione los mayores beneficios en equilibrio con el espaciamiento entre plantas.

9. LITERATURA CITADA

- Aguilera, C. M. y Martínez, E. R. 1996. Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Mex.
- Alvarado, C. y Mondragón, J. 1987. **Uso de microcuencas y coberturas para la producción de cebolla de temporal en el Norte de Guanajuato.** CIFAP – Gto. Primera Reunión Científica Forestal y Agropecuaria. INIFAP. SARH. Gto. México.
- Anaya, G. M. 1973^a. **Captación “in situ” de agua de lluvia bajo diferentes tratamientos al suelo para la producción de rábano.** VI Congreso de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.
- Anaya, G. M. 1973^b. **Microcuencas de captación de agua de lluvia para cultivos de maíz, girasol y hortalizas.** En: Avances en la Enseñanza y la Investigación. 1973. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Anaya, G. M. 1974. **Different soil treatments for harvesting water for radish production in the Mexico Valley.** Pp. Gary W. F. (ed.) Proceedings in the water harvesting symposium. Phoenix, Arizona.
- Anaya, G. M. 1988. **Research on Rainfall Collection for Agriculture Purpose in México.** In: Proceedings of the International Conference on Dryland Farming. Amarillo, Bushland, Texas. U.S.A.
- Anaya, G. M. 1990. **Investigación sobre aprovechamiento de la lluvia en zonas agrícolas de temporal deficiente.** I Simposium nacional sobre captación “in situ” de agua de lluvia y manejo de escurrimientos superficiales a nivel parcela. 26 – 28 de Septiembre. Zacatecas, Zacatecas. Editores: M.C. Armando Legaspi Guzmán y M.C. Jorge L. Tovar Salinas.
- Ballén, S. J. A., Galarza, G. M. A. y Ortiz, M. R. O. 2004. **Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia.** XVI Seminario Nacional de hidráulica e Hidrología. Sociedad Colombiana de Ingenieros. 29, 30 y 31 de octubre de 2004. Armenia, Colombia.

- Camacho R.G., Garrido O. y Lima M.G. 1995. **Caracterización de nueve genotipos de maíz (*Zea mays* L.) en relación a área foliar y coeficiente de extinción de luz.** Instituto de Agronomía. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Venezuela.
- CDIA, 1980. **El cultivo de maíz en México.** Editorial Mexicana. Centro de Investigaciones Agrarias. México, Distrito Federal.
- CIMMYT. 2004. **Enfermedades Del maíz: Una guía para su identificación en campo.** Cuarta Edición. Programa de maíz del CIMMYT. México. D.F.
- CONAZA, s/a. **Boletín Cactus No. 10.** Comisión Nacional de Zonas Áridas. México, D. F.
- Concepción, C. J., Mendoza, E. M., Andrio, E. J., Rangel, L. A., Rodríguez, H. S. A. y Moreno, M. E. 2005. **Adaptabilidad de variedades tropicales de maíz al Bajío de Guanajuato.** Producción agrícola. Producción semestral de investigación científica. Universidad Juárez del Edo. De Durango. Venecia, Dgo. México. Agrofaz. Volumen 5. No. 1.
- Coombs J., Hall D.O., Long S.P. y Scurlock J.M.O. 1988. **Técnicas en Fotosíntesis y Bioproductividad.** Editorial Futura. Segunda Edición. UNEP. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Chapman, S.R. and Carter, L.P. 1986. **Crop production. Principles and Practices.** W. H. Freeman and Company. USA.
- Doorenbos, J. y Kassam, A. H. 1986. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos.** Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Estudio de la FAO. Riego y drenaje. No. 33. Roma, Italia.
- Dowswell, C.R., Paliwal, R.L. and Cantrll, R.P. 1996. **Maize in the Third Worl.** Ed. Westview Press. United States of América.
- Duarte, R. J. J. 1985. **Captación de agua de lluvia y su optimización para la producción de maíz bajo condiciones de temporal de la Cuenca del Valle de México.** Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Espinoza, B. A., López, M. J. D. y Serrato, C. J. S. 2004. **Evaluación de genotipos usando análisis multivariado.** Producción agrícola.

- Producción semestral de investigación científica. Universidad Juárez del Edo. De Durango. Venecía, Dgo. México. Agrofaz. Volumen 4. No. 1.
- FAO. 1997. **Captación de agua de lluvia**. Publicación de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Primera Edición en Español. Impreso en México. 128 p.
- FAO. 2000. Global Agroecological Zones. Prediction of agricultural production. FAO/IIASA. Roma, Italia. <http://www.fao.org/ag/AGL/agll/gaez/index.htm>
- FAO. 2001. Producción. Vol. 53.
- FAO. 2002. **Agua y cultivos**. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Roma, Italia.
- FAO. 2002. **Agua y Cultivos; Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura**. Roma.
- Gallegos C. 2004. **Siembra del maíz Temporalero**. Compañía Editora de la Laguna. Durango. México.
- García, E. 2008. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Ed. Talleres Larios. México, D.F.
- González, A. V. 1995. **El maíz y su conservación**. Ed. Trillas Primera Edición. México.
- Guevara, C. J. 1988. **La agricultura mexicana y su desarrollo regional**. Universidad Autónoma Chapingo.
- Inifap. 2002. **Tecnología de Cacahuete Unicultivo y Asociado con Maíz de Temporal en la zona Media de San Luis Potosí**. Centro de Investigación Regional del Noreste. San Luis Potosí, México.
- Jiménez, O. F. 1988. **Necesidades hídricas de los cultivos**. Curso corto de Agrometeorología realizado entre el 14 -25 de marzo. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Landeros, S. F. 2000. **Balance Hídrico del cultivo de maíz (Zea mays L.) bajo diferentes tamaños de microcuencas de captación de lluvia**. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Centro de Edafología. Montecillo, México.
- Lara, M. J. L. y Lasso, M. L. M. 1990. **Eficiencia en el uso del agua en tres sistemas de captación de agua de lluvia con adición de estiércol en**

- maíz.** I Simposium nacional sobre captación “*in situ*” de agua de lluvia y manejo de escurrimientos superficiales a nivel parcela. Editores: M.C. Armando Legaspi Guzmán y M.C. Jorge L. Tovar Salinas. 26 – 28 de Septiembre. Zacatecas, Zacatecas. México.
- López, M. J. D. y Salazar, S. E. 1998. **Comparación de genotipos de maíz bajo condiciones deficientes de humedad en el suelo.** Revista TERRA latinoamericana. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. Vol. 16. No. 004.
- Luna, F. M., Gutiérrez, S. J. R., Peña, R. A., Echavarría, Ch. F. G. y Martínez, G. J. 2005. **Comportamiento de variedades precoces de maíz en la región Semiárida y Árida del Centro – Norte de México.** Revista Fitotecnia Mexicana. Vol. 28. No. 001.
- Llanos C. M, 1984. **EL MAIZ: Su cultivo y aprovechamiento.** 1ª Edición. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. España.
- Martínez, G. A. 1985. **Respuesta del maíz a cuatro tamaños de microcuencas y diferente arreglo topológico bajo temporal deficiente en Sandoval, Aguascalientes.** Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Martínez, G. M. A., Anaya, G. M., Tovar, S. J. L., Martínez, G. A. y Zapata, R. J. 1986. **Respuesta del maíz a cuatro tamaños de microcuena y diferente arreglo topológico bajo temporal deficiente en Sandoval, Aguascalientes.** Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. Agrociencia. No. 64. 87 – 103.
- Mora, G. M. 1990. **Evaluación de técnicas de captación de agua de lluvia *in situ* en la producción de maíz (*Zea mays* L.) para grano y forraje en Tecamac, México.** Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Mora, G. M. y Tovar, S. J. 1990. **Evaluación de microcuencas de captación de agua de lluvia *in situ*, distancia entre contras y densidades de población en la producción de maíz para grano de Tecamac, Edo. De México.** I Simposium nacional sobre captación “*in situ*” de agua de lluvia y manejo de escurrimientos superficiales a nivel parcela.

- Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. 26 – 28 de Septiembre. Zacatecas, Zacatecas. Editores: M.C. Armando Legaspi Guzmán y M.C. Jorge L. Tovar Salinas.
- Núñez, A. R. 1982. **Captación de agua lluvia y conservación de la humedad del suelo en la producción de cebada bajo condiciones de temporal**. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Ortiz, M. J. 1975. **Efecto de las microcuencas para la captación *in situ* de la lluvia sobre el régimen de humedad del suelo y la producción de maíz (*Zea mays* L.) y girasol (*Helianthus agnus* L.)**. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Osorio, A. G. 1989. **Optimización del agua de lluvia mediante captación *in situ*, cobertura orgánica y arreglo espacial en maíz en función del volumen de agua por planta**. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Osorio, A. G. y Tovar, S. J. L. 1990. **Distribución radical del maíz y de la humedad del suelo bajo la técnica de captación *in situ* del agua de lluvia**. I Simposium nacional sobre captación “*in situ*” de agua de lluvia y manejo de escurrimientos superficiales a nivel parcela. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. 26 – 28 de Septiembre. Zacatecas, Zacatecas. Editores: M.C. Armando Legaspi Guzmán y M.C. Jorge L. Tovar Salinas.
- Pegov, S. A. y Jomyakov, P.M. 1991. Modelación matemática del desarrollo de ecosistemas. Publ. Hidrometeoizdat, Rusia.
- Reyes, C. P. 1990. **El maíz y su cultivo**. 1ra. Edición. A.G.T. Editor, S.A. México, D. F.
- Robles, S. R. 1979. **Producción de granos y forrajes**. Editorial Limusa, S. A. de C. V. México, D. F.
- Robles, S. R. 1990. **Producción de granos y forrajes**. Noriega Editores. Editorial Limusa, S. A. de C. V. 5ta. Edición. México, D. F.
- SAGARPA. 2007. **Anuario Estadístico de Cereales**. Centro de Estadística Agropecuaria. México, D.F.

- SARH. 1991. **Manual de conservación del suelo y del agua.** Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Sys, C.; Van Ranst, E. y Debaveye, J. 1991. Land evaluation. Part II. Methods of land evaluation. Agricultural Publication, No. 7. Bélgica.
- Soto, R. y Martín, P. 1989. **Determinación de los requerimientos pluviométricos en tres materiales genéticos de maíz.** Memoria del XXII Congreso de la Ciencia del Suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Montecillo, México.
- Tanaka A. y Yamaguchi J. 1981. **Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento de grano en maíz.** Segunda impresión. Centro de Botánica. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Taylor S.A. 1987. Physical edaphology. The physics of irrigated and non-irrigated soils. Publ. San Francisco Freeman W.H. and Co., San Francisco, USA.
- Tijerina Ch.L. 2005. **Requerimiento y Calendario de Riego.** Notas del Curso HID602 Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera. Colegio de Postraduos. Montecillo, México.
- Tovar S.J.L. 2001. **Eficiencia del uso de agua de lluvia en la producción de maíz (*Zea mays L.*) con sistemas de captación *in situ*.** Colegio de Postgraduados. Especialidad de Edafología. Montecillo, Texcoco, Estado de México. México.
- Tovar S.J.L. 1977. **Captación y aprovechamiento del recurso lluvia como una alternativa para la producción de grano y forraje de maíz en zonas de temporal deficiente.** Tesis de Maestría. Escuela Nacional de Agricultura. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- UACH. 2004. **Nuevas variedades de maíz formadas en la Universidad Autónoma Chapingo.** Folleto. Dirección General de Investigación y Postgrado. Chapingo. México.
- Vega, V. D. D. y Ramírez, M. P. 2004. **Situación y perspectivas del maíz en México.** Publicación de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. México.
- Waldren R.P. 1988. **Crop-Water Relations.** Edited by Teare I.D. and Peet M.M.. Wiley-Interscience Publication.

ANEXOS

Cuadro A 1. Cálculo de la probabilidad de lluvia ocurrida en los meses de Junio a Noviembre durante el periodo de 1985 a 2005. Montecillos, México.

Año	Precipitación	Precipitación ordenada	Número de orden	Probabilidad de lluvia %
1985	392	637.2	1	4.55
1986	372.6	579.2	2	9.09
1987	435.8	559.4	3	13.64
1988	360.6	546.9	4	18.18
1989	394.9	545.5	5	22.73
1990	579.2	496.9	6	27.27
1991	545.5	491.9	7	31.82
1992	637.2	481.9	8	36.36
1993	480.1	480.1	9	40.91
1994	491.9	449.1	10	45.45
1995	412.2	435.8	11	50.00
1996	383.7	412.2	12	54.55
1997	292.7	407.3	13	59.09
1998	496.9	394.9	14	63.64
1999	481.9	392	15	68.18
2000	546.9	383.7	16	72.73
2001	348.9	372.6	17	77.27
2002	346.2	360.6	18	81.82
2003	559.4	348.9	19	86.36
2004	449.1	346.2	20	90.91
2005	407.3	292.7	21	95.45

$$P = \frac{M}{N+1} * 100$$

Donde:

P = Probabilidad de ocurrencia, en %.

M = Número de orden.

N = Número de observaciones.

N = 21.

Cuadro A 2. Datos utilizados en la obtención de las curvas de tensión y esfuerzo de humedad del suelo, para las profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm. Montecillo. México. 2006.

Prof. 0-20 cm PO =4.31			Prof. 20-40 cm PO =2.95			Prof. 40-60 cm PO =2.30		
T (atm)	Ps (%)	EHS (atm)	T (atm)	Ps (%)	EHS (atm)	T (atm)	Ps (%)	EHS (atm)
15	10.65	19.31	15	10.48	17.95	15	11.85	17.3
14	10.71	18.31	14	10.54	16.95	14	11.91	16.3
13	10.78	17.31	13	10.59	15.95	13	11.98	15.3
12	10.85	16.31	12	10.66	14.95	12	12.06	14.3
10	11.01	14.31	10	10.82	12.95	10	12.23	12.3
9	11.11	13.31	9	10.91	11.95	9	12.33	11.3
8	11.22	12.31	8	11.01	10.95	8	12.44	10.3
6	11.49	10.31	6	11.27	8.95	6	12.73	8.3
4	11.91	8.31	4	11.65	6.95	4	13.15	6.3
2	12.67	6.31	2	12.35	4.95	2	13.93	4.95
1	13.59	5.31	1	13.2	3.95	1	14.87	3.95
0.5	14.92	4.81	0.5	14.43	3.45	0.5	16.2	3.45
0.4	15.62	4.71	0.4	15.08	3.35	0.4	16.89	3.35
0.3	17.53	4.61	0.3	16.91	3.25	0.3	18.63	3.25

Cuadro A 3. Datos de precipitación ocurrida durante el ciclo del cultivo de maíz. Junio-Noviembre.
Montecillo, Méx. 2006.

Fecha	Lámina (mm)	Fecha	Lámina (mm)	Fecha	Lámina (mm)	Fecha	Lámina (mm)	Fecha	Lámina (mm)
02-Jun	7.2	13-Jul	6.4	23-Ago	1.5	03-Oct	0.6	13-Nov	56.9
03-Jun	10.2	14-Jul	0.7	24-Ago	5.4	04-Oct	0	14-Nov	0
04-Jun	14.6	15-Jul	1.1	25-Ago	11.9	05-Oct	3.2	15-Nov	0
05-Jun	0	16-Jul	0.6	26-Ago	0.3	06-Oct	0	16-Nov	0
06-Jun	4	17-Jul	1.9	27-Ago	0	07-Oct	1.4	17-Nov	0
07-Jun	0	18-Jul	0	28-Ago	0	08-Oct	0	18-Nov	0
08-Jun	0	19-Jul	1.1	29-Ago	0	09-Oct	0	19-Nov	7.1
09-Jun	0	20-Jul	0.6	30-Ago	0	10-Oct	16.9	20-Nov	0
10-Jun	0	21-Jul	0	31-Ago	1.6	11-Oct	0	21-Nov	0
11-Jun	0	22-Jul	31.3	01-Sep	4.8	12-Oct	0	22-Nov	0
12-Jun	0	23-Jul	10.2	02-Sep	0	13-Oct	0.8	23-Nov	0
13-Jun	0	24-Jul	0.5	03-Sep	1.9	14-Oct	4.4	24-Nov	0
14-Jun	0	25-Jul	0	04-Sep	4.1	15-Oct	0.1	25-Nov	0
15-Jun	0	26-Jul	0	05-Sep	7.7	16-Oct	0	26-Nov	0
16-Jun	6.6	27-Jul	0.5	06-Sep	1.3	17-Oct	0		
17-Jun	7.90	28-Jul	7.8	07-Sep	0	18-Oct	0		
18-Jun	17.6	29-Jul	0	08-Sep	15.9	19-Oct	0		
19-Jun	0	30-Jul	0	09-Sep	0.6	20-Oct	0		
20-Jun	0	31-Jul	0.7	10-Sep	0	21-Oct	0		
21-Jun	0.6	01-Ago	0	11-Sep	0	22-Oct	0.4		
22-Jun	0	02-Ago	5.1	12-Sep	0.5	23-Oct	0		
23-Jun	3.2	03-Ago	0.2	13-Sep	5	24-Oct	0.8		
24-Jun	0	04-Ago	3.3	14-Sep	0	25-Oct	0.8		
25-Jun	0	05-Ago	11.8	15-Sep	0	26-Oct	3		
26-Jun	0	06-Ago	5.7	16-Sep	0	27-Oct	0.3		
27-Jun	0	07-Ago	0	17-Sep	2.7	28-Oct	3.4		
28-Jun	0.4	08-Ago	7.3	18-Sep	1.2	29-Oct	0		
29-Jun	0.2	09-Ago	0.3	19-Sep	1.9	30-Oct	0		
30-Jun	5.9	10-Ago	1	20-Sep	0.8	31-Oct	0		
01-Jul	4	11-Ago	4.4	21-Sep	0	01-Nov	0		
02-Jul	3.8	12-Ago	0.5	22-Sep	0	02-Nov	0		
03-Jul	0	13-Ago	0	23-Sep	12.6	03-Nov	0		
04-Jul	0	14-Ago	2.5	24-Sep	0	04-Nov	0		
05-Jul	3.8	15-Ago	0.4	25-Sep	0	05-Nov	4.7		
06-Jul	0	16-Ago	0	26-Sep	1.1	06-Nov	0		
07-Jul	0.2	17-Ago	0	27-Sep	0.5	07-Nov	0		
08-Jul	0	18-Ago	6.2	28-Sep	0	08-Nov	0		
09-Jul	2.4	19-Ago	0.5	29-Sep	1.4	09-Nov	0		
10-Jul	2.2	20-Ago	0	30-Sep	16.2	10-Nov	0.2		
11-Jul	0	21-Ago	2.9	01-Oct	7.1	11-Nov	3.8		
12-Jul	15.4	22-Ago	0.2	02-Oct	0.1	12-Nov	0		

Fuente: Estación Meteorológica del Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx.

Cuadro A 4. Valores del contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 0 -15 cm. Etapa fenológica: Establecimiento. Montecillo, Méx. 2006.

Profundidad: 0-15 cm								
Fecha	Tratamientos							
	A		B		C		D	
02-Jun	0.0945	b	0.1090	a	0.1102	a	0.0943	b
05-Jun	0.1453	a	0.1486	a	0.1497	a	0.1449	a
07-Jun	0.1256	ab	0.1292	ab	0.1373	a	0.1211	b
11-Jun	0.1107	b	0.1218	a	0.1217	a	0.1089	b
13-Jun	0.1089	a	0.1140	a	0.1162	a	0.1026	a
15-Jun	0.1090	a	0.1110	a	0.1143	a	0.1041	a

Valores dentro de cada fila seguidos por la misma letra no difieren significativamente al nivel 0.05 de acuerdo con la prueba de Tukey.

Cuadro A 5. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 15-30 cm. Etapa fenológica: Establecimiento. Montecillo, Méx. 2006.

Profundidad: 15-30 cm								
Fecha	Tratamientos							
	A		B		C		D	
02-Jun	0.1257	b	0.1377	ab	0.1439	a	0.1245	b
05-Jun	0.1871	b	0.1940	a	0.1930	ab	0.1898	ab
07-Jun	0.1774	ab	0.1832	ab	0.1845	a	0.1745	b
09-Jun	0.1766	a	0.1811	a	0.1806	a	0.1744	a
11-Jun	0.1678	a	0.1808	a	0.1765	a	0.1593	a
13-Jun	0.1531	a	0.1660	a	0.1589	a	0.1507	a
15-Jun	0.1668	a	0.1660	a	0.1692	a	0.1625	a

Valores dentro de cada fila seguidos por la misma letra no difieren significativamente al nivel 0.05 de acuerdo con la prueba de Tukey.

Cuadro A 6. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 0-15 cm. Etapa fenológica: Vegetativa. Montecillo, Méx. 2006.

Fecha	Profundidad 15 cm							
	Tratamientos							
	A		B		C		D	
17-Jun	0,1350	a	0,1397	a	0,1396	a	0,1352	a
19-Jun	0,1336	a	0,1391	a	0,1384	a	0,1337	a
21-Jun	0,1283	a	0,1314	a	0,1334	a	0,1251	a
23-Jun	0,1294	a	0,1313	a	0,1337	a	0,1262	a
25-Jun	0,1185	a	0,1244	a	0,1249	a	0,1137	a
27-Jun	0,1145	ab	0,1200	a	0,1202	a	0,1084	b
29-Jun	0,1008	ab	0,1050	ab	0,1094	a	0,0994	b
01-Jul	0,1050	b	0,1102	a	0,1111	a	0,1070	b
03-Jul	0,1055	b	0,1107	a	0,1117	a	0,1053	b
05-Jul	0,1041	a	0,1049	a	0,1073	a	0,1030	a
07-Jul	0,0996	a	0,1056	a	0,1045	a	0,1002	a
09-Jul	0,0950	a	0,0991	a	0,0989	a	0,0939	a
11-Jul	0,0966	a	0,1001	a	0,1003	a	0,0953	a
13-Jul	0,1262	a	0,1310	a	0,1297	a	0,1278	a
15-Jul	0,1185	a	0,1207	a	0,1223	a	0,1124	a
17-Jul	0,1063	b	0,1110	ab	0,1155	a	0,1046	b
19-Jul	0,1057	a	0,1133	a	0,1138	a	0,1059	a
21-Jul	0,0962	b	0,1084	a	0,1088	a	0,0954	b
23-Jul	0,1617	a	0,1653	a	0,1662	a	0,1626	a
25-Jul	0,1312	a	0,1348	a	0,1439	a	0,1328	a
27-Jul	0,1231	ab	0,1254	a	0,1280	a	0,1197	b
29-Jul	0,1238	ab	0,1299	a	0,1294	ab	0,1236	b
31-Jul	0,1065	b	0,1126	a	0,1124	a	0,1070	b
02-Ago	0,0921	a	0,0982	a	0,0984	a	0,0933	a
04-Ago	0,0980	a	0,1038	a	0,1056	a	0,1001	a
06-Ago	0,1261	b	0,1329	a	0,1326	a	0,1290	ab
08-Ago	0,1177	b	0,1212	a	0,1214	a	0,1179	b
10-Ago	0,1131	a	0,1201	a	0,1194	a	0,1133	a
12-Ago	0,1278	a	0,1320	a	0,1330	a	0,1298	a
14-Ago	0,1144	b	0,1189	ab	0,1198	a	0,1171	ab
16-Ago	0,0891	b	0,1009	a	0,1006	a	0,0926	b
18-Ago	0,0890	a	0,0907	a	0,0904	a	0,0857	a
20-Ago	0,0918	a	0,0954	a	0,0971	a	0,0918	a

Valores dentro de cada fila seguidos por la misma letra no difieren significativamente al nivel 0.05 de acuerdo con la prueba de Tukey.

Cuadro A 7. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 30 cm. Etapa fenológica: Vegetativa. Montecillo, Méx. 2006.

Fecha	Profundidad 30 cm							
	Tratamientos							
	A		B		C		D	
17-Jun	0,2134	a	0,2189	a	0,2200	a	0,2141	a
19-Jun	0,1971	a	0,2028	a	0,2064	a	0,1986	a
21-Jun	0,1965	a	0,2004	a	0,2020	a	0,1952	a
23-Jun	0,1932	a	0,2049	a	0,2015	a	0,1927	a
25-Jun	0,1688	a	0,1832	a	0,1814	a	0,1684	a
27-Jun	0,1648	bc	0,1711	ab	0,1742	a	0,1639	c
29-Jun	0,1564	ab	0,1641	a	0,1648	a	0,1513	b
01-Jul	0,1496	b	0,1570	a	0,1571	a	0,1481	b
03-Jul	0,1495	b	0,1550	a	0,1572	a	0,1496	b
05-Jul	0,1411	a	0,1453	a	0,1477	a	0,1409	a
07-Jul	0,1311	b	0,1369	ab	0,1393	a	0,1326	ab
09-Jul	0,1264	a	0,1306	a	0,1330	a	0,1262	a
11-Jul	0,1429	a	0,1461	a	0,1495	a	0,1389	a
13-Jul	0,1832	a	0,1841	a	0,1854	a	0,1815	a
15-Jul	0,1623	a	0,1734	a	0,1772	a	0,1680	a
17-Jul	0,1519	b	0,1579	ab	0,1667	a	0,1494	b
19-Jul	0,1555	a	0,1653	a	0,1654	a	0,1591	a
21-Jul	0,1361	c	0,1558	ab	0,1586	a	0,1402	bc
23-Jul	0,2030	a	0,2039	a	0,2034	a	0,2033	a
25-Jul	0,1983	a	0,1988	a	0,2003	a	0,1947	a
27-Jul	0,1766	a	0,1790	a	0,1795	a	0,1729	a
29-Jul	0,1677	b	0,1773	a	0,1805	a	0,1666	b
31-Jul	0,1508	b	0,1572	ab	0,1594	a	0,1504	b
02-Ago	0,1306	ab	0,1382	ab	0,1429	a	0,1300	b
04-Ago	0,1386	a	0,1409	a	0,1443	a	0,1389	a
06-Ago	0,1551	b	0,1601	a	0,1576	ab	0,1572	ab
08-Ago	0,1535	b	0,1601	a	0,1614	a	0,1555	ab
10-Ago	0,1587	a	0,1619	a	0,1603	a	0,1584	a
12-Ago	0,1537	b	0,1586	a	0,1589	a	0,1545	ab
14-Ago	0,1425	a	0,1435	a	0,1438	a	0,1393	a
16-Ago	0,1337	c	0,1452	a	0,1416	ab	0,1378	bc
18-Ago	0,1204	a	0,1231	a	0,1224	a	0,1200	a
20-Ago	0,1227	a	0,1268	a	0,1274	a	0,1224	a

Valores dentro de cada fila seguidos por la misma letra no difieren significativamente al nivel 0.05 de acuerdo con la prueba de Tukey.

Cuadro A 8. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 15 cm. Etapa fenológica: Floración. Montecillo, Méx. 2006.

Fecha	Profundidad 0-15 cm							
	Tratamientos							
	A		B		C		D	
22-Ago	0,0881	a	0,0906	a	0,0895	a	0,0881	a
24-Ago	0,0777	a	0,0842	a	0,0832	a	0,0784	a
26-Ago	0,1214	a	0,1248	a	0,1245	a	0,1188	a
28-Ago	0,0971	a	0,1064	a	0,1063	a	0,1012	a
30-Ago	0,0855	a	0,0906	a	0,0908	a	0,0890	a
01-Sep	0,0948	a	0,0994	a	0,1002	a	0,0956	a
03-Sep	0,0983	a	0,1051	a	0,1043	a	0,1007	a
05-Sep	0,1059	a	0,1096	a	0,1093	a	0,1057	a
07-Sep	0,0944	b	0,1024	a	0,1017	a	0,0948	b
09-Sep	0,1148	a	0,1179	a	0,1181	a	0,1157	a
11-Sep	0,1045	a	0,1105	a	0,1133	a	0,1065	a
13-Sep	0,0884	a	0,0922	a	0,0908	a	0,0876	a
15-Sep	0,0842	b	0,0877	ab	0,0896	a	0,0846	b
17-Sep	0,0806	a	0,0840	a	0,0836	a	0,0811	a
19-Sep	0,0785	a	0,0832	a	0,0797	a	0,0790	a
21-Sep	0,0766	a	0,0805	a	0,0810	a	0,0748	a
23-Sep	0,0875	b	0,0906	ab	0,0930	a	0,0882	ab
25-Sep	0,0833	a	0,0892	a	0,0873	a	0,0839	a

Valores dentro de cada fila seguidos por la misma letra no difieren significativamente al nivel 0.05 de acuerdo con la prueba de Tukey.

Cuadro A 9. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 30 cm. Etapa fenológica: Floración. Montecillo, Méx. 2006.

Fecha	Profundidad 0-15 cm							
	Tratamientos							
	A		B		C		D	
22-Ago	0,1148	a	0,1235	a	0,1232	a	0,1178	a
24-Ago	0,1159	a	0,1198	a	0,1197	a	0,1160	a
26-Ago	0,1498	a	0,1495	a	0,1489	a	0,1478	a
28-Ago	0,1345	a	0,1427	a	0,1401	a	0,1373	a
30-Ago	0,1122	a	0,1260	a	0,1219	a	0,1156	a
01-Sep	0,1232	a	0,1317	a	0,1294	a	0,1268	a
03-Sep	0,1285	a	0,1353	a	0,1355	a	0,1300	a
05-Sep	0,1339	c	0,1405	ab	0,1436	a	0,1366	bc
07-Sep	0,1349	a	0,1402	a	0,1382	a	0,1343	a
09-Sep	0,1487	a	0,1508	a	0,1510	a	0,1495	a
11-Sep	0,1413	a	0,1472	a	0,1460	a	0,1433	a
13-Sep	0,1281	a	0,1358	a	0,1331	a	0,1284	a
15-Sep	0,1131	a	0,1193	a	0,1205	a	0,1164	a
17-Sep	0,1150	a	0,1204	a	0,1202	a	0,1155	a
19-Sep	0,1180	a	0,1195	a	0,1198	a	0,1185	a
21-Sep	0,1131	a	0,1186	a	0,1180	a	0,1128	a
23-Sep	0,1302	a	0,1329	a	0,1337	a	0,1305	a
25-Sep	0,1130	a	0,1204	a	0,1201	a	0,1133	a

Valores dentro de cada fila seguidos por la misma letra no difieren significativamente al nivel 0.05 de acuerdo con la prueba de Tukey.

Cuadro A 10. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($\text{gr}_{\text{agua}}/\text{gr}_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 15 cm. Etapa fenológica: Formación del elote y llenado del grano. Montecillo, Méx. 2006.

Fecha	Profundidad 15 cm							
	Tratamientos							
	A		B		C		D	
27-Sep	0,0887	b	0,0924	ab	0,0945	a	0,0883	b
29-Sep	0,0718	b	0,0781	ab	0,0795	a	0,0729	ab
01-Oct	0,1105	a	0,1129	a	0,1148	a	0,1111	a
03-Oct	0,0984	a	0,1073	a	0,1026	a	0,0962	a
05-Oct	0,0888	a	0,0938	a	0,0901	a	0,0876	a
07-Oct	0,0814	a	0,0859	a	0,0859	a	0,0814	a
09-Oct	0,0726	a	0,0782	a	0,0785	a	0,0708	a
11-Oct	0,1283	a	0,1267	a	0,1281	a	0,1262	a
13-Oct	0,0964	a	0,1037	a	0,1018	a	0,0976	a
15-Oct	0,0851	b	0,0920	a	0,0917	ab	0,0859	ab
17-Oct	0,0761	b	0,0869	a	0,0825	ab	0,0779	ab
19-Oct	0,0722	b	0,0781	a	0,0787	a	0,0702	b
21-Oct	0,0685	b	0,0748	a	0,0749	a	0,0698	b
23-Oct	0,0734	a	0,0763	a	0,0769	a	0,0733	a
25-Oct	0,0796	ab	0,0849	a	0,0840	ab	0,0794	b
27-Oct	0,0779	a	0,0794	a	0,0816	a	0,0788	a
29-Oct	0,0738	a	0,0794	a	0,0801	a	0,0733	a
31-Oct	0,0717	b	0,0751	ab	0,0752	a	0,0716	b
02-Nov	0,0705	a	0,0744	a	0,0736	a	0,0705	a
04-Nov	0,0676	b	0,0739	a	0,0726	ab	0,0696	ab
06-Nov	0,0741	a	0,0777	a	0,0778	a	0,0758	a
08-Nov	0,0697	b	0,0763	a	0,0746	ab	0,0704	ab
10-Nov	0,0783	a	0,0823	a	0,0821	a	0,0767	a
12-Nov	0,0873	a	0,0905	a	0,0920	a	0,0872	a
14-Nov	0,1363	a	0,1400	a	0,1382	a	0,1366	a
16-Nov	0,1129	a	0,1212	a	0,1206	a	0,1138	a

Valores dentro de cada fila seguidos por la misma letra no difieren significativamente al nivel 0.05 de acuerdo con la prueba de Tukey.

Cuadro A 11. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 30 cm. Etapa fenológica: Formación del elote y llenado del grano. Montecillo, Méx. 2006.

Fecha	Profundidad 30 cm							
	Tratamientos							
	A		B		C		D	
27-Sep	0,1233	a	0,1267	a	0,1276	a	0,1228	a
29-Sep	0,1123	a	0,1146	a	0,1161	a	0,1110	a
01-Oct	0,1519	a	0,1536	a	0,1540	a	0,1532	a
03-Oct	0,1558	a	0,1597	a	0,1593	a	0,1566	a
05-Oct	0,1329	a	0,1394	a	0,1393	a	0,1310	a
07-Oct	0,1221	ab	0,1273	ab	0,1278	a	0,1203	b
09-Oct	0,1167	a	0,1224	a	0,1247	a	0,1168	a
11-Oct	0,1859	a	0,1854	a	0,1856	a	0,1853	a
13-Oct	0,1411	a	0,1484	a	0,1466	a	0,1423	a
15-Oct	0,1304	a	0,1377	a	0,1381	a	0,1298	a
17-Oct	0,1277	a	0,1327	a	0,1338	a	0,1286	a
19-Oct	0,1163	a	0,1214	a	0,1210	a	0,1133	a
21-Oct	0,1071	bc	0,1168	a	0,1141	ab	0,1069	c
23-Oct	0,1106	b	0,1176	a	0,1183	a	0,1125	ab
25-Oct	0,1225	a	0,1259	a	0,1259	a	0,1231	a
27-Oct	0,1230	a	0,1238	a	0,1253	a	0,1233	a
29-Oct	0,1207	a	0,1233	a	0,1223	a	0,1215	a
31-Oct	0,1108	a	0,1155	a	0,1151	a	0,1108	a
02-Nov	0,1044	b	0,1121	a	0,1109	ab	0,1055	ab
04-Nov	0,1031	a	0,1097	a	0,1113	a	0,1037	a
06-Nov	0,1093	a	0,1128	a	0,1138	a	0,1101	a
08-Nov	0,1047	a	0,1102	a	0,1105	a	0,1056	a
10-Nov	0,1185	a	0,1227	a	0,1204	a	0,1164	a
12-Nov	0,1293	a	0,1312	a	0,1329	a	0,1280	a
14-Nov	0,2059	a	0,2095	a	0,2083	a	0,2076	a
16-Nov	0,1783	a	0,1879	a	0,1837	a	0,1776	a

Valores dentro de cada fila seguidos por la misma letra no difieren significativamente al nivel 0.05 de acuerdo con la prueba de Tukey.

Cuadro A 12. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 15 cm. Etapa fenológica: Madurez. Montecillo, Méx. 2006.

Fecha	Profundidad: 0-15 cm							
	Tratamientos							
	A		B		C		D	
18-Nov	0,1009	c	0,1074	ab	0,1099	a	0,1030	bc
20-Nov	0,1087	a	0,1140	a	0,1128	a	0,1069	a
22-Nov	0,1017	a	0,1109	a	0,1115	a	0,1028	a
24-Nov	0,0992	b	0,1076	ab	0,1101	a	0,1007	b
26-Nov	0,0916	a	0,1005	a	0,0994	a	0,0939	a

Valores dentro de cada fila seguidos por la misma letra no difieren significativamente al nivel 0.05 de acuerdo con la prueba de Tukey.

Cuadro A 13. Valores de contenido de humedad gravimétrico ($gr_{\text{agua}}/gr_{\text{suelo}}$), correspondientes a la profundidad de 30 cm. Etapa fenológica: Madurez. Montecillo, Méx. 2006.

Fecha	Profundidad: 0-15 cm							
	Tratamientos							
	A		B		C		D	
18-Nov	0,1661	a	0,1705	a	0,1721	a	0,1635	a
20-Nov	0,1730	a	0,1759	a	0,1758	a	0,1723	a
22-Nov	0,1696	a	0,1740	a	0,1734	a	0,1675	a
24-Nov	0,1647	a	0,1712	a	0,1684	a	0,1629	a
26-Nov	0,1556	a	0,1615	a	0,1604	a	0,1563	a

Valores dentro de cada fila seguidos por la misma letra no difieren significativamente al nivel 0.05 de acuerdo con la prueba de Tukey.

Cuadro A 14. Datos utilizados en la determinación del valor de K correspondiente al tratamiento A.

Altura (cm)	Q (nm)	$Af_{\text{acumulada}}$ (m^2)	F [m^2 área foliar / m^2 sup. terreno]	$\ln(Q_0/Q_F)$
240 (Q_0)	2200	-	-	-
220-240	2100	0.00	0.00	0.05
200-220	2050	0.37	0.37	0.07
180-200	1550	0.93	0.93	0.35
160-180	1350	1.55	1.55	0.49
140-160	950	2.22	2.22	0.84
120-140	500	2.88	2.88	1.48
100-120	350	3.94	3.94	1.84
80-100	450	4.74	4.74	1.59
60-80	250	5.67	5.67	2.17
40-60	150	5.91	5.91	2.69
20-40	300	6.35	6.35	1.99

0-20	150	6.46	6.46	2.69
------	-----	------	------	------

Cuadro A 15. Datos utilizados en la determinación del valor de K correspondiente al tratamiento B.

Altura (cm)	Q (nm)	Af _{acumulada} (m ²)	F [m ² área foliar /m ² sup. terreno]	Ln (Q ₀ /Q _F)
320 (Q ₀)	1950	-	-	-
300-320	1800	0.00	0.00	0.08
280-300	1600	0.13	0.13	0.20
260-280	1100	0.32	0.32	0.57
240-260	900	0.60	0.60	0.77
220-240	1100	0.97	0.97	0.57
200-220	550	1.46	1.46	1.27
180-200	600	2.17	2.17	1.18
160-180	450	2.75	2.75	1.47
140-160	350	3.47	3.47	1.72
120-140	350	3.89	3.89	1.72
100-120	300	4.38	4.38	1.87
80-100	200	4.60	4.60	2.28
60-80	300	4.77	4.77	1.87
40-60	500	4.92	4.92	1.36
20-40	350	5.07	5.07	1.72
0-20	250	5.28	5.28	2.05

Cuadro A 16. Datos utilizados en la determinación del valor de K correspondiente al tratamiento C.

Altura (cm)	Q (nm)	Af _{acumulada} (m ²)	F [m ² área foliar /m ² sup. terreno]	Ln (Q ₀ /Q _F)
260 (Q ₀)	2200	-	-	-
240-260	2100	0.00	0.00	0.05
220-240	1400	0.31	0.31	0.45
200-220	1300	1.23	1.23	0.53
180-200	1000	2.22	2.22	0.79
160-180	500	3.01	3.01	1.48
140-160	550	3.57	3.57	1.39
120-140	450	4.03	4.03	1.59
100-120	230	4.46	4.46	2.26
80-100	150	4.75	4.75	2.69
60-80	200	4.91	4.91	2.40
40-60	400	5.01	5.01	1.70
20-40	300	5.12	5.12	1.99
0-20	200	5.24	5.24	2.40

Cuadro A 17. Datos utilizados en la determinación del valor de K correspondiente al tratamiento D.

Altura (cm)	Q (nm)	A _f acumulada (m ²)	F [m ² área foliar /m ² sup. terreno]	Ln (Q ₀ /Q _F)
260 (Q ₀)	2000	-	-	-
260-280	1850	0.00	0.00	0.08
240-260	1800	0.07	0.07	0.11
220-240	1350	0.27	0.27	0.39
200-220	1050	0.93	0.93	0.64
180-200	650	1.67	1.67	1.12
160-180	600	2.31	2.31	1.20
140-160	600	2.90	2.90	1.20
120-140	500	3.35	3.35	1.39
100-120	550	3.70	3.70	1.29
80-100	450	4.00	4.00	1.49
60-80	600	4.38	4.38	1.20
40-60	550	4.51	4.51	1.29
20-40	450	4.62	4.62	1.49
0-20	350	4.75	4.75	1.74

Cuadro A 18. Contenido de Humedad óptimo del cultivo de maíz por etapa fenológica.

	ESTABLEC.	VEGETATIVA	FLORACION	FORMACION ELOTE Y LLENADO DEL GRANO	MADUREZ
Duracion (días)	13	66	37	52	10
UC (etapa)	1,98	21,04	17,12	20,89	3,26
UC/DÍA/ETAPA	0,15	0,32	0,46	0,40	0,33
PMP (4.3 cm) +UC/DIA (L*)	4,45	4,62	4,76	4,70	4,63
θ _{óptima} (%)	11,24	11,66	12,03	11,87	11,68

UC (etapa) = Uso Consuntivo por etapa, cm.

θ_{óptima} (%) = (L*) / (1.32 (Da) x (30 cm (Pr)) x 100.

Donde:

θ_{óptima} (%) = Contenido de humedad óptimo, %.

(L*) = Lámina, cm.

Da= Densidad aparente del suelo, gr cm⁻³.

Pr = profundidad, cm.

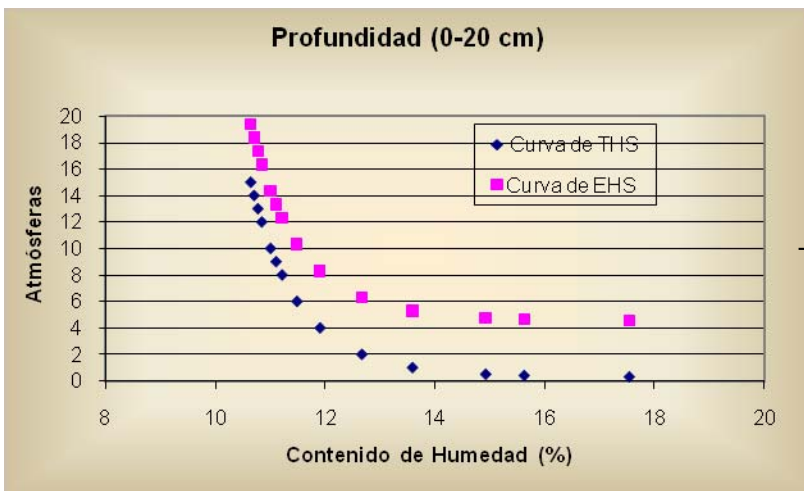
Cuadro A 19. Valores de K_j por etapa fenológica de los bloques I y III.

Etapa fenológica	Bloques I y III			
	A	B	C	D
Establecimiento	1.000	1.000	1.000	1.000
Vegetativa	0.902	0.959	0.966	0.905
Formación del elote y llenado del grano	0.382	0.492	0.491	0.382

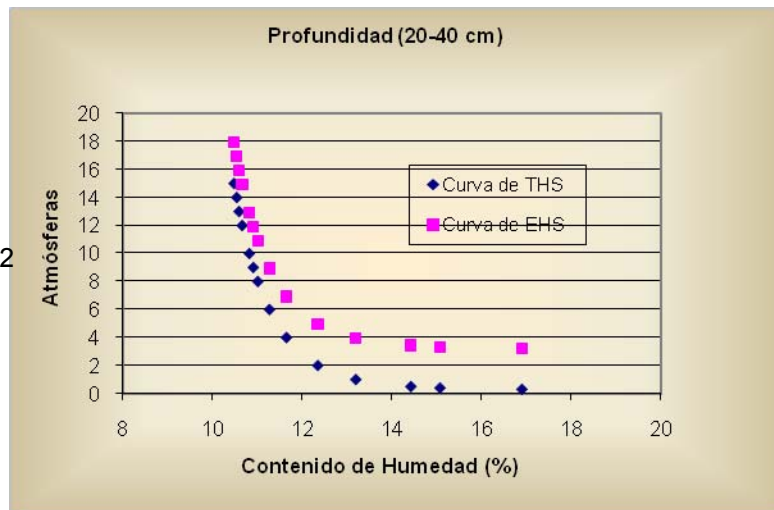
Floración	0.254	0.364	0.297	0.261
Madurez	1.000	1.000	1.000	1.000
K_{hidr}	0.707	0.763	0.751	0.710

Cuadro A 20. Valores de K_j por etapa fenológica de los bloques II y IV.

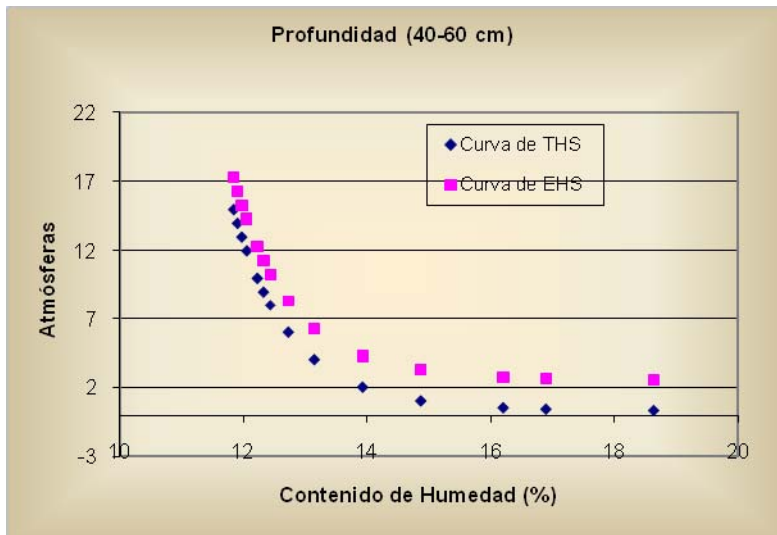
Etapa fenológica	Bloques II y IV			
	A	B	C	D
Establecimiento	0.873	1.000	1.000	0.951
Vegetativa	0.894	0.953	0.954	0.909
Formación del elote y llenado del grano	0.354	0.528	0.495	0.413
Floración	0.291	0.316	0.386	0.264
Madurez	1.000	1.000	1.000	1.000
K_{hidr}	0.682	0.760	0.767	0.707



$$T = \frac{6.504099076 \times 10^{13}}{P_s^{12.3083}} + 0.268059$$



$$T = \frac{2.8638 \times 10^{14}}{P_s^{13.0236}} + 0.27102$$



$$T = \frac{2.16948 \times 10^{15}}{P_s^{13.1952}} + 0.26236$$

Figura A 1. Curvas de Tensión y Esfuerzo de Humedad del suelo del sitio experimental, Montecillo. México. 2006.

