

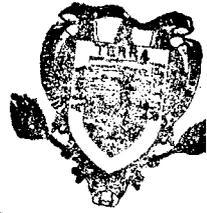
RESPUESTA DEL CULTIVO DE FRIJOL (Phaseolus
vulgaris) A LA SEQUIA INDUCIDA

CARLOS EFREN RAMIREZ CONTRERAS

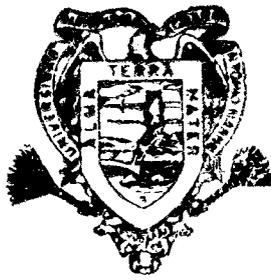
T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN RIEGO Y DRENAJE

Universidad Autónoma
"ANTONIO NARRO"



BIBLIOTECA



Universidad Autónoma Agraria
Antonio Narro

PROGRAMA DE GRADUADOS

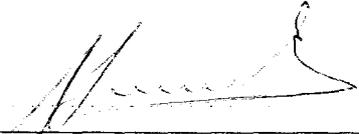
Buenavista, Saltillo, Coah.

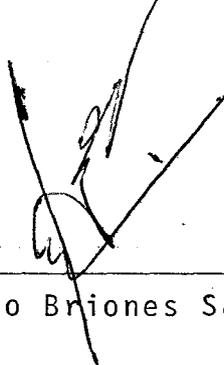
ABRIL DE 1989

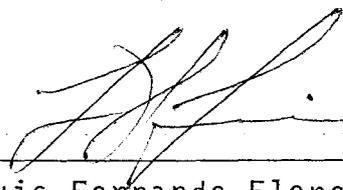
Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de asesoría y aprobada como requisito parcial, para optar al grado de

MAESTRO EN CIENCIAS ESPECIALIDAD DE RIEGO Y DRENAJE

COMITE PARTICULAR

Asesor Principal: 
M.C. Alejandro Zermeño González

Asesor: 
M.C. Gregorio Briones Sánchez

Asesor: 
Dr. Luis Fernando Flores Luis

Asesor: "Antonio Narro"
Escuela Agraria Autónoma
de Asuntos Postgrado




Dr. Eleuterio López Pérez



BIBLIOTECA
EGIDIO G. REYES
BANCO DE
U.A.A.A.

Buenavista, Saltillo, Coahuila, Abril de 1989.

AGRADECIMIENTOS.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Al INIFAP especialmente al CENID-RASPA

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Al Comité de Sinodales:

Ing. M.C. Alejandro Zermeño González

Ph.D. Luis Fernando Flores Lui

Ing. M.C. Gregorio Briones Sánchez

Al personal de campo del CENID-RASPA especialmente:

A los señores Rosendo de la Cruz " Guero Mais ", Romualdo Márquez Domínguez " Ruma ", Victor M. Ríos Murillo " Tolano " y Martimiano Domínguez " Ton ".

DEDICATORIA

A LA MEMORIA DE MI PADRE:

JESUS RAMIREZ PEREZ.

COMPENDIO
RESPUESTA DEL CULTIVO DE FRIJOL (Phaseolus vulgaris)

A LA SEQUIA INDUCIDA

POR

CARLOS EFREN RAMIREZ CONTRERAS

MAESTRIA

RIEGO Y DRENAJE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, ABRIL 1989

M.C. Alejandro Zermeño González - Asesor

Palabras claves: Sequía, frijol, evapotranspiración, funciones de producción, estrés hídrico.

El propósito de este trabajo de investigación fue estudiar la respuesta de diferentes cantidades de agua aplicadas en tres etapas fenológicas del frijol, variedad Pinto Laguna 80. Los niveles de estudio seleccionaron en base al concepto de trabajo o energía. El momento del riego se hizo cuando el potencial promedio ponderado llegó al punto de marchitez permanente.

Se evaluaron dos modelos para estimar la evapotranspiración real del cultivo y tres modelos para inferir sobre la respuesta del rendimiento del cultivo sometido a sequía.

Los resultados indican que es posible estimar la evapotranspiración con precisión y que los índices de sequía analizados son confiables en igual medida con la finalidad de inferir en el rendimiento. Por lo anterior, se concluye que el manejo de estas herramientas permiten optimizar el uso del recurso hídrico para fines agrícolas.

ABSTRACT

RESPONSE OF CROP BEAN (Phaseolus vulgaris)
TO INDUCED DROUGHT

BY

CARLOS EFREN RAMIREZ CONTRERAS

MASTER OF SCIENCE

IRRIGATION AND DRAINAGE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, APRIL 1989

M.C. Alejandro Zermeño González - Adviser

Key words: Drought, bean, evapotranspiration, yield function, water -
stress.

The purpose of this research was to determine the response of -
different amounts of water applied in three fenological stages of bean-
crop (Pinto Laguna 80). Studies level were chosen according to work -
or energy concept. The irrigation moment was applied when weighted mean
potential reached wilt permanent point.

Two models were evaluated in order to predict real evapotranspi-
ration in bean crop and other three models were evaluated in order to -
infer crop yield response submitted to drought.

Results show that it is possible to predict evapotranspiration with precision. Also, the analyzed drought indexes were reliable in - equal measure in order to infer yield. The end conclusion was: the - handling these tools optimize the use of water resource in agriculture.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
INDICE DE CUADROS.....	
INDICE DE FIGURAS.....	
INTRODUCCION.....	1
REVISION DE LITERATURA.....	3
GENERALIDADES DE SEQUIA.....	3
INDICES PARA EVALUACION DE SEQUIA.....	4
MODELOS PARA SIMULAR LA RESPUESTA DE LOS CULTIVOS AL DEFICIT HIDRICO.....	7
DETERMINACION DE LA CUANTIFICACION Y EL MOMENTO DEL RIEGO.....	9
MATERIALES Y METODOS.....	13
LOCALIZACION DEL SITIO EXPERIMENTAL.....	13
CARACTERISTICAS CLIMATICAS.....	13
PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO.....	13
PARCELA EXPERIMENTAL.....	14
FACTORES Y NIVELES DE ESTUDIO.....	15
FACTORES DE ESTUDIO.....	15
NIVELES DE ESTUDIO.....	15
DISEÑO EXPERIMENTAL.....	18
TRABAJOS DE CAMPO.....	19
PREPARACION DEL TERRENO.....	19
SIEMBRA Y FERTILIZACION.....	19

	Págin
LABORES DE CULTIVO.....	20
RIEGOS.....	20
DATOS DE CLIMA.....	20
MEDICION DEL CONSUMO DE AGUA.....	20
RESULTADOS.....	21
DURACION DEL CICLO DE CULTIVO.....	21
NUMERO DE RIEGOS Y LAMINAS CONSUMIDAS.....	21
EVOLUCION DE LA HUMEDAD EN EL SUELO.....	21
MODELOS PARA LA ESTIMACION DE LA EVAPOTRANSPIRACION - DEL CULTIVO.....	27
RENDIMIENTO DE GRANO.....	37
MODELOS PARA ESTIMAR EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO EN - FUNCION DE LOS INDICES DE SEQUIA.....	39
HUMEDAD APROVECHABLE RESIDUAL.....	39
DEFICIT EVAPOTRANSPIRATIVO.....	42
DISCUSION.....	47
MODELOS PARA EVAPOTRANSPIRACION.....	47
RENDIMIENTOS.....	47
MODELOS PARA LA ESTIMACION DEL RENDIMIENTO.....	48
CONCLUSIONES.....	50
RESUMEN.....	51
LITERATURA CITADA.....	52
APENDICE A.....	54

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1 PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO.....	13
2 MODELOS DE REGRESION PARA EL COMPORTAMIENTO DE LA RE- TENCION DE HUMEDAD.....	16
3 VALORES DE LA TENSION Y SU CORRESPONDIENTE CONTENIDO- DE HUMEDAD.....	17
4 NIVELES DE ESTUDIO DEL EXPERIMENTO.....	18
5 TRATAMIENTOS RESULTANTES DE LA MATRIZ SAN CRISTOBAL..	19
6 NUMERO DE RIEGOS Y LAMINAS CONSUMIDAS EN CADA TRATA - MIENTO.....	22
7 EVOLUCION DE LA HUMEDAD OBSERVADA (mm).....	23
8 EVOLUCION DE LA HUMEDAD OBSERVADA (mm).....	24
9 EVOLUCION DE LA HUMEDAD OBSERVADA (mm).....	25
10 EVOLUCION DE LA HUMEDAD OBSERVADA (mm).....	26
11 EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y LA ESTIMADA (mm).	29
12 EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y LA ESTIMADA (mm).	30
13 EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y LA ESTIMADA (mm).	31
14 EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y LA ESTIMADA (mm).	32
15 EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y LA ESTIMADA (mm).	33
16 EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y LA ESTIMADA (mm).	34
17 EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y LA ESTIMADA (mm).	35
18 REGRESIONES LINEALES DE LOS MODELOS DE SIMULACION DE - LA EVOLUCION DEL CONSUMO DE AGUA.....	36
19 RENDIMIENTOS RESULTANTES DEL EXPERIMENTO (gr/planta).	38

Cuadro		Página
20	ANALISIS DE VARIANZA DEL RENDIMIENTO DE FRIJOL.....	38
21	HUMEDAD APROVECHABLE Y RESIDUAL PROMEDIO PONDERADA - (%).....	41
22	COMPARACION DE VALORES ESTIMADOS Y OBSERVADOS DEL REN- DIMIENTO DE GRANO CON RESPECTO A LA HUMEDAD APROVECHA- BLE RESIDUAL PROMEDIO PONDERADA.....	41
23	COMPARACION DE VALORES ESTIMADOS Y OBSERVADOS DEL REN- DIMIENTO RELATIVO CON RESPECTO A LA HUMEDAD APROVECHA- BLE RESIDUAL PROMEDIO PONDERADA.....	42
24	EVAPOTRANSPIRACION DESARROLLADA EN DIFERENTES FAS ^{OS} - (mm) PARA LA CAPA 0-80 cm.....	43
25	DEFICIT EVAPOTRANSPIRATIVO (1-ET/ET _{máx.}) Y RENDIMIEN- TOS RESULTANTES.....	44
26	COMPARACION DE VALORES ESTIMADOS Y OBSERVADOS DEL REN- DIMIENTO RELATIVO CON RESPECTO AL DEFICIT EVAPOTRANS- PIRATIVO.....	44
27	COEFICIENTES DE ESTRES HIDRICO Y DE SUSCEPTIBILIDAD..	45
28	VALORES DE LOS COEFICIENTES Y RENDIMIENTOS PARA EL MO- DELO DE FUNCION DE PRODUCCION.....	46
1A	EVOLUCION DE LA HUMEDAD OBSERVADA (mm).....	55
2A	EVOLUCION DE LA HUMEDAD OBSERVADA (mm).....	56
3A	EVOLUCION DE LA HUMEDAD OBSERVADA (mm).....	57
4A	EVOLUCION DE LA HUMEDAD OBSERVADA (mm).....	58
5A	EVOLUCION DE LA HUMEDAD OBSERVADA (mm).....	59
6A	EVOLUCION DE LA HUMEDAD OBSERVADA (mm).....	60
7A	EVOLUCION DE LA HUMEDAD OBSERVADA (mm).....	61

Cuadro		Página
8A	EVOLUCION DE LA HUMEDAD OBSERVADA (mm).....	62
9A	EVOLUCION DE LA HUMEDAD OBSERVADA (mm).....	63
10A	EVAPORACION (mm) DE TANQUE TIPO "A" REGISTRADA EN LA ESTACION CLIMATOLOGICA DEL CENID-RASPA EN EL CICLO - DE CULTIVO.....	64

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	CURVA TIPICA DE RETENCION DE HUMEDAD DE UN SUELO...	11
2	DIMENSIONES DE LA PARCELA EXPERIMENTAL.....	14
3	NIVELES DE ESTUDIO REPRESENTADOS EN GRAFICA.....	18
4	EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL TRATAMIENTO UNO.....	23
5	EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL TRATAMIENTO NUEVE.....	24
6	EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL TRATAMIENTO OCHO.....	26
7	EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL TRATAMIENTO TRECE.....	27
8	COMPARACION DEL CONSUMO DE AGUA DEL TRATAMIENTO - UNO.....	29
9	COMPARACION DEL CONSUMO DE AGUA DEL TRATAMIENTO - NUEVE.....	30
10	COMPARACION DEL CONSUMO DE AGUA DEL TRATAMIENTO - OCHO.....	31
11	COMPARACION DEL CONSUMO DE AGUA DEL TRATAMIENTO - TRECE.....	32
12	COMPARACION DEL CONSUMO DE AGUA DEL TRATAMIENTO - DOS.....	33
13	COMPARACION DEL CONSUMO DE AGUA DEL TRATAMIENTO - TRES.....	34
14	COMPARACION DEL CONSUMO DE AGUA DEL TRATAMIENTO - DOCE.....	35

Figura	Página
15 AJUSTE DEL MODELO DE REDDY PARA 168 DATOS.....	36
16 AJUSTE DEL MODELO DE PALACIOS PARA 168 DATOS.....	37
1A EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL TRATAMIENTO DOS.....	55
2A EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL TRATAMIENTO TRES.....	56
3A EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL TRATAMIENTO CUATRO.....	57
4A EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL TRATAMIENTO CINCO.....	58
5A EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL TRATAMIENTO SEIS.....	59
6A EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL TRATAMIENTO SIETE.....	60
7A EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL TRATAMIENTO DIEZ.....	61
8A EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL TRATAMIENTO ONCE.....	62
9A EVOLUCION DE LA HUMEDAD DEL TRATAMIENTO DOCE.....	63

INTRODUCCION

En México, solo el 25 por ciento de la agricultura se desarrolla bajo condiciones de riego; el resto está sometida a la variabilidad del temporal o a la humedad residual que queda de un año para otro. Uno de los principales problemas a los que se enfrenta esta extensa área temporalera, es la deficiencia de humedad, que impide a los cultivos completar satisfactoriamente su ciclo vegetativo, ya sea por la baja cantidad de lluvia, la mala distribución de ésta durante la estación de crecimiento, o por ambas causas.

Los períodos de sequía afectan la etapa vegetativa de las plantas ya que retardan o aceleran su desarrollo y, de manera indirecta, disminuyen la cantidad de energía luminosa interceptada, la cual se relaciona en gran medida con la producción de materia seca. Durante la floración y llenado de grano, la sequía puede reducir drásticamente la producción económica de un cultivo, como frecuentemente sucede en la región centro-norte del país con los cultivos de maíz y frijol.

Ante un problema de esta magnitud, resalta la urgencia de hacer más eficiente el uso del agua disponible en la agricultura de secano y en la de riego lo cual, a su vez, conduce a la necesidad de entender bien el efecto que el agua y la deficiencia de ésta tienen sobre el crecimiento, desarrollo y producción de granos y materia seca.

El agua, como es sabido, juega un papel esencial en todas las funciones fisiológicas de la planta. Por ejemplo, sirve como un reactante-

en numerosos procesos metabólicos (incluyendo la fotosíntesis), como un medio para la estabilización y funcionamiento de membranas y enzimas, así como en la ionización y transporte de fotosintatos. Por otro lado, es un elemento básico para inflar y mantener la rigidez en la estructura de células y tejidos.

El enfoque de las investigaciones orientadas a resolver problemas en áreas de riego, se ha concentrado a incrementar el rendimiento de los cultivos, independientemente de la cantidad de agua requerida. Sin embargo, en zonas áridas el problema fundamental es el agua disponible. Es decir, pocos trabajos se han desarrollado basados en mantener los rendimientos constantes con la mínima cantidad de agua.

Los trabajos recientes sobre la identificación de los mecanismos de resistencia a sequía han requerido de equipo e instrumentos sofisticados tales como el porómetro de estado estable, que por su costo dificulta el desarrollo de este tipo de investigaciones en México. Por todo lo anterior, se plantea el presente trabajo.

Objetivo

Evaluar el o los índices de sequía para caracterizar el estrés en intensidad y duración para los cultivos básicos.

Comparar tres modelos de simulación que reproducen la respuesta del cultivo de frijol (Phaseolus vulgaris) a la sequía.

Hipótesis.

La capacidad de resistencia a la sequía puede explicarse por medio de las características hídricas de la planta (factor de susceptibilidad) y su adaptación a los déficit de agua en el suelo (factor de

REVISION DE LITERATURA

Generalidades de Sequía

Hanson y Hitz (1982) afirman que la falta de agua ha sido la mayor fuerza selectiva en la evaluación en las plantas y la habilidad para contender los déficit de agua, lo cual es una determinación importante de la distribución natural de las plantas y de la distribución de los cultivos en la productividad. Acorde a conocimientos de los mecanismos que confirman adaptación al medio ambiente de sequía se han obtenido valores teóricos y prácticos. La adaptación de las plantas a ese medio ambiente puede ser expresado a 4 niveles: fenológico o desarrollo, morfológico, fisiológico y metabólico. De estos niveles, las adaptaciones metabólicas y bioquímicas al medio ambiente de sequía son los menos conocidos y entendibles, de cualquier manera los datos bioquímicos comparativos para otros estreses y otros eucariotes indican que existen. Aún más, algunas adaptaciones de los niveles bioquímicos de los animales al medio ambiente de estrés son respuestas que concurren demasiado lento, solamente se hace si otras adaptaciones son imposibles o inefectivas ésto puede ser un argumento para plantas mesófitas con algunos grados que son inevitables en el déficit interno del agua, así la capacidad de adaptación metabólica al estrés de agua es una condición esencial por existencia.

La respuesta metabólica de las plantas en el déficit de agua puede verse en dos formas diferentes: como una confusión de que el tallo sufre lesiones por estres inducido en las partes vulnerables en el metaboli

órdenes de los mecanismos reguladores del metabolismo o metabólicos, cuales favorecen el crecimiento de la planta durante todo su período después del estrés.

Hsiao et al. (1970) menciona que el estrés hídrico es particularmente detrimental al crecimiento y rendimiento del cultivo si ocurre en estado de rápido crecimiento, la duración y grado de estrés hídrico - factores importantes en la determinación final de los rendimientos.

Fereres (1981) menciona que la fuerza motriz que hace fluir el agua desde la masa del suelo a las superficies evaporantes de las hojas, la caída del potencial hídrico en la hoja como consecuencia de la pérdida de agua producida por la transpiración. Este descenso del potencial agua origina gradientes de potencial en la planta, los cuales serán pronunciados donde las resistencias al paso del agua sean mayores. tanto, al descender el potencial del agua en las zonas transpiratorias, se origina la fuerza motriz para que el agua se mueva de los tejidos adyacentes al xilema tales como el mesófilo foliar, córtex y floema. Las pérdidas de agua en los tejidos de la raíz, tallo y hojas son las que originan los déficits de agua en las plantas. Así pues, los déficits hídricos son una consecuencia inevitable del movimiento del agua en contra del campo gravitatorio y del rozamiento.

Indices para Evaluación de Sequía

Doorenbos y Kassam (1979) afirman que cuando no se atienden todas las necesidades de agua del cultivo, el déficit de agua en la planta puede llegar hasta el punto de que se vean afectados el crecimiento del cultivo y su rendimiento. La manera en que el déficit de agua afecta al crecimiento del cultivo y a su rendimiento, varía con la especie del cultivo y con el período vegetativo del mismo. Para evaluar el efecto de la

falta de agua en la planta sobre el rendimiento mediante la cuantificación de la evapotranspiración relativa (ET_a/ET_m), el análisis de los resultados de las investigaciones realizadas demuestra que es posible determinar las pérdidas de rendimiento relativo si se dispone de información sobre el rendimiento real (Y_a) en relación con el rendimiento máximo (Y_m), bajo distintos regímenes de suministro de agua.

Doraiswamy y Thomson (1982) desarrollaron un modelo de predicción en la capa superficial de suelo donde sucede principalmente la evaporación del suelo desnudo (0-5 cm) y es sustancial a la emergencia de las plantas. A ésta le sigue una subcapa (5-150 cm) donde suceden pequeños movimientos de humedad y la mayor parte de la pérdida de agua es por transpiración de la planta.

En este trabajo mencionan que la razón de evapotranspiración a evaporación potencial (ET/PE) ha sido usada por algunos investigadores (Hanks, 1974; Tanner y Jury, 1976; Kanemasu 1977; Rasmussen y Hanks, 1977) como una medida del uso estacional del agua por el cultivo y el déficit de humedad. El promedio de ET/PE de los estados fenológicos específicos ha sido usado como un índice para reflejar la condición del déficit de humedad experimentada por el cultivo y su efecto inhibitorio sobre el rendimiento final (Hanks 1974). El cambio en la razón entre un mínimo de 0.0 y un máximo de 1.0 es influenciado principalmente por dos factores; un déficit de agua en el suelo y el estado de desarrollo del cultivo. Un déficit de agua en el suelo reduce las tasas de evapotranspiración, particularmente cuando la evaporación potencial es comparativamente grande. La tasa es quizá más pequeña durante los primeros estados de desarrollo del cultivo o tal vez durante la senescencia, cuando la evapotranspiración es más pequeña que la evaporación potencial. Las prueba

del modelo separan los últimos efectos en orden para identificar una condición de déficit de humedad al cultivo.

El índice de estrés diario del cultivo es generado de una estimación de requerimientos de agua del cultivo y la demanda evaporativa de la atmósfera. La diferencia en las tasas de evapotranspiración del cultivo y la evaporación potencial sin limitaciones (Eto/PE) y las condiciones actuales de humedad en el suelo (ET/PE) proporcionan el índice de estrés. El índice elimina el sesgo en la magnitud de la razón (ET/PE) introducida por el estado de desarrollo del cultivo. El índice de humedad del cultivo ajusta la duración del período de desarrollo entre dos etapas fenológicas.

Levitt (1972) propone una forma en que se pueden evaluar los parámetros de la sequía inducida, a saber:

$$Ad = \frac{\Psi_e}{\Psi_p} \quad \dots 1$$

donde:

Ad = Índice de evasión a la sequía

Ψ_e = Potencial del agua en el ambiente

Ψ_p = Potencial del agua en la planta en equilibrio con el ambiente.

$$\Psi_e = \frac{RT}{\bar{V}} \ln (H.R.) \quad \dots 2$$

donde:

\bar{V} = Volumen molar parcial del agua

R = Constante universal de los gases

T = Temperatura absoluta

H.R.= Humedad relativa

La tolerancia a sequía (T_d) se mide cuando el déficit de agua ocasiona justo un 50 por ciento de muerte a las plantas por deshidratación, siendo:

$$T_d = \Psi_{p50} \quad \dots 3$$

donde:

Ψ_{p50} = Potencial del agua en la planta al 50 por ciento de muerte por deshidratación

Modelos para Simular la Respuesta de los Cultivos al Déficit Hídrico

Hiler y Clark (1971) afirman que la optimización del uso de agua en la producción de alimentos es cada vez más imperativo; un concepto para esta optimización es el índice de estrés de agua (SDI), el cual provee de recursos cuantitativos para la determinación del estrés impuesto sobre un cultivo durante su estación de desarrollo.

El índice de estrés de agua es determinado de un factor de estrés de agua y un factor de susceptibilidad del cultivo. El factor de estrés de agua (SD) es una medida del grado y duración del déficit de agua en la planta, el factor de susceptibilidad del cultivo (CS) depende del estado de desarrollo y la especie de un cultivo dado e indica la susceptibilidad de la planta a un conocido déficit de agua. Finalmente; el SDI tiene aplicaciones en la programación del riego, predicción de rendimientos para un cultivo dado bajo condiciones de estrés y en la interpretación de experimentos de riego.

La expresión del índice de estrés de agua es la siguiente:

$$SDI = \sum_{i=1}^n (SD_i) (CS_i) \quad \dots 4$$

donde:

$$SDi = 1 - Cet$$

$$CSi = \frac{Y_{max} - Y_{tratamiento}}{Y_{max}}$$

Cet = Evapotranspiración relativa

Y_{max} = Rendimiento o materia seca máxima

Y tratamiento = Rendimiento o materia seca del tratamiento

Palacios (1981) presenta una manera de estimar la evapotranspiración actual o real de los cultivos mediante la función.

$$ETi = \left[K + F \left[\left(\frac{ti}{tc} \right)^2 \left(1 - \frac{ti}{tc} \right) \right] \right] \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{EVi}{60} \right) \left(\frac{1 - HAi}{HAi} \right)} \right] EVi \dots \dots 5$$

donde:

ETi = Evapotranspiración real de los cultivos

K = Parámetro de la función que indica la proporción de evaporación del suelo desnudo

F = Índice medio del área foliar, es decir la relación entre el área de las hojas (por un lado) y la superficie del suelo cubierta por el cultivo.

ti = Duración del cultivo en días desde la siembra hasta el período i.

tc = Duración total del ciclo vegetativo del cultivo en días

EVi = La evaporación en un tanque tipo A

Según el modelo propuesto por Reddy (1983).

$$Cet = \left(1 + \left(\frac{5 - En}{16} \right) \left(\frac{tn}{En} \right)^{1/2} \right) \text{EXP} \left(- tn+a \right) / Kbn \dots \dots 6$$

donde:

tn = Tiempo después de una lluvia (días)

K = Máxima capacidad de retención de humedad disponible (CC-PM) del suelo en la zona radicular (mm)

a = Número de días después de una lluvia durante los cuales la humedad disponible retenida en los primeros diez cm del suelo pueden satisfacer la evapotranspiración potencial.

bn = Coeficiente de desarrollo del cultivo

De León (1981) evaluó modelos de producción para el cultivo de maíz en función del régimen hídrico en diferentes etapas fenológicas. Dichos modelos fueron, el propuesto por Hiler y Clark (1971), el generado por Jensen (1968) y el que utilizó Taylor (1952). Es decir, modelos aditivos y multiplicativos resultando todos ellos con altos valores de correlación en la predicción de los rendimientos.

Determinación de la Cuantificación y el Momento del Riego

Fereres et al. (1978) establecieron un potencial mátrico del suelo ponderado en base al consumo relativo de agua en cada estrato, siendo:

$$\Psi_s = \sum_{i=1}^n \Psi_{si} CR_i$$

donde:

Ψ_s = Potencial mátrico del suelo ponderado

Ψ_{si} = Potencial mátrico del suelo en estrato i

n = Número de estratos donde existe consumo de agua

CR_i = Consumo relativo de agua en el estrato i

Faires (1975). Define el concepto de trabajo como la energía en-transición (no almacenada en un fluido en movimiento) que cruza las fronteras de un sistema que podría producir concebiblemente el único efecto de levantar un peso.

Escobar y Ramírez (1979) hicieron un análisis dimensional de las variables que intervienen en la curva de retención de humedad en el suelo, el que se fundamenta en lo siguiente:

La relación tensión (T) y el contenido de humedad (Ps) en la curva de retención de humedad, representa el trabajo que la planta requiere invertir para consumir la humedad de un contenido a otro; esto se explica al realizar el producto de un diferencial de un contenido de humedad (Ps) por un diferencial de tensión (T) analizado dimensionalmente.

$$Ps = \text{Kilogramo de agua/kilogramo de suelo} = (\text{kgw/kgs})$$

$$T = \text{Kilogramo fuerza/unidades de área} = (\text{kgf/L}^2)$$

El producto queda:

$$\left(\frac{\text{kgw}}{\text{kgs}} \right) \left(\frac{\text{kgf}}{\text{L}^2} \right)$$

Como kgw es susceptible de convertirla a unidades de volumen L^3 al multiplicar por la densidad de agua, que es la unidad, resulta:

$$\left(\frac{\text{L}^3}{\text{kgs}} \right) \left(\frac{\text{kgf}}{\text{L}^2} \right)$$

El producto daría:

$$\left(\frac{\text{kgf} \cdot \text{L}}{\text{kgs}} \right) = \left(\frac{\text{trabajo}}{\text{kgs}} \right) = \left(\frac{\text{W}}{\text{kgs}} \right)$$

Lo cual representa el trabajo que invierten la planta y el clima para extraer el agua de un contenido de humedad a otro por cada kilogramo de suelo que lo contenga.

La curva de retención de humedad se obtiene por regresión simple

e los puntos obtenidos en muestreos por la olla y membrana de presión ver figura 1). De esta manera, el área bajo la curva representa el trabajo total desde capacidad de campo hasta el punto de marchitez permanente.

$$W/\text{kgs} = \int_{cc}^{\text{pmp}} f(P_s) dT \quad \dots 7$$

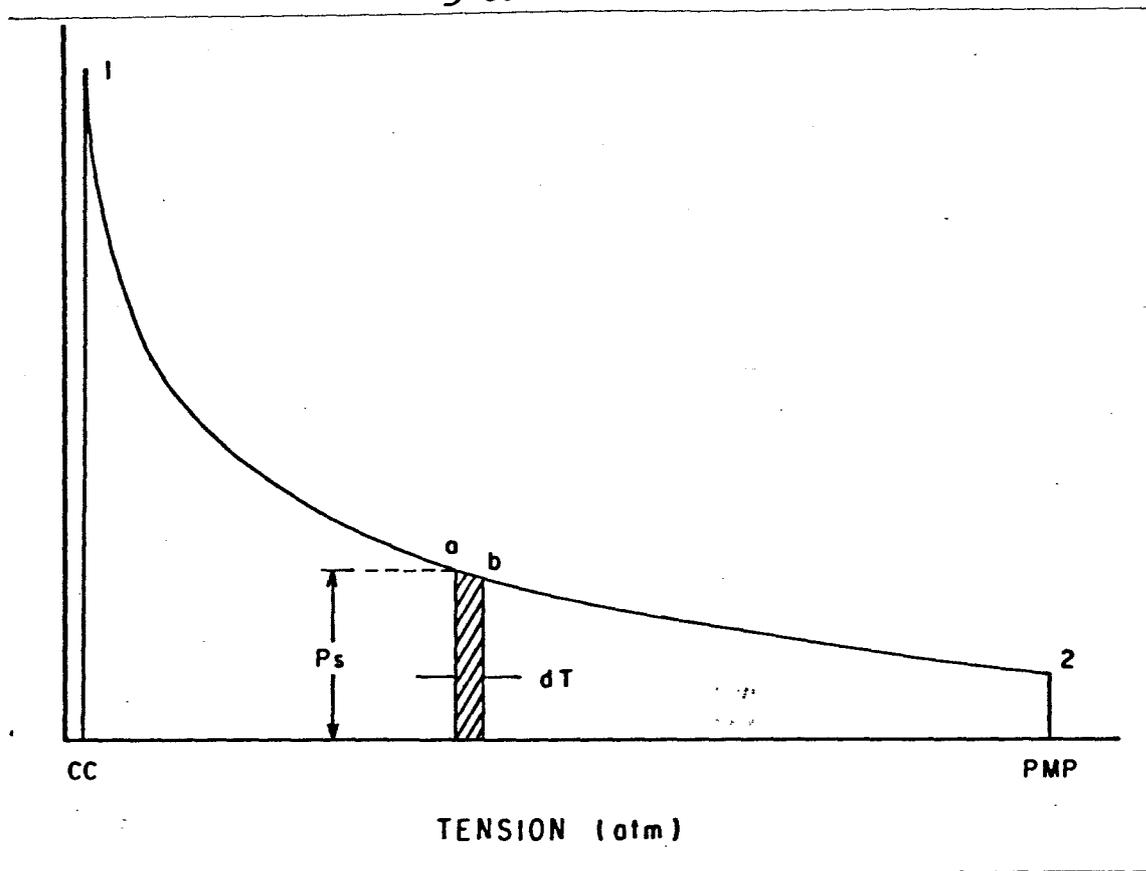


Figura 1. Curva típica de retención de humedad de un suelo.

En el proceso típico, la presión aumenta y el contenido de humedad cambia como se sugiere por la curva 1 - a-b-2, curva denominada trayectoria del punto del estado y la cual representa el abatimiento de la humedad en el suelo.

Clothier y Heiler (1983), mencionan el concepto " Interfase Aire tierra " de Dixon (1972) el cual establece que " La Micro-rugosidad y la

Macroporosidad de la interfase aire-tierra controla la infiltración regulando el flujo de agua y desplazando el aire del suelo bajo sistemas de macroporo o microporo ".

La lámina equivalente de cada alícuota de agua, d , aplicada por un aspersor cada período de tiempo t' es a cierta tasa de riego V_0 :

$$d = V_0 t'$$

Por ejemplo, los cañones pueden aplicar una lámina significativa de agua cada 200 segundos o más. Los aspersores convencionales pueden emitir pequeños pulsos entre cada 50 segundos y los microaspersores pueden tener valores de t' de entre 10 segundos o menos.

Es significativo notar que cuando t' es pequeño, cada pulso de agua libre es absorbido muy rápidamente, aún cerca de saturación.

MATERIALES Y METODOS

Localización del Sitio Experimental

El experimento se estableció en el campo de CENID-RASPA, localizado en el margen derecho del canal Sacramento km 6.500 y con 26° latitud norte, longitud de 104°W y una altitud de 1135 m.s.n.m.

Características Climáticas

Para la región Iáguñera según Thornätwaite, es muy seco con deficiencia de lluvias en todas las estaciones y temperaturas semi-cálida con invierno benigno. De acuerdo con Koppen, el clima es desértico con lluvias en verano y temperatura caliente. Los registros de temperatura indican una media anual de 21°C con una media de 27 grados para el mes más caluroso. La precipitación es de 250 mm anuales.

Propiedades Físicas del Suelo

Las propiedades físicas del suelo se presentan en el cuadro 1, por estratos hasta la profundidad de interés para este experimento.

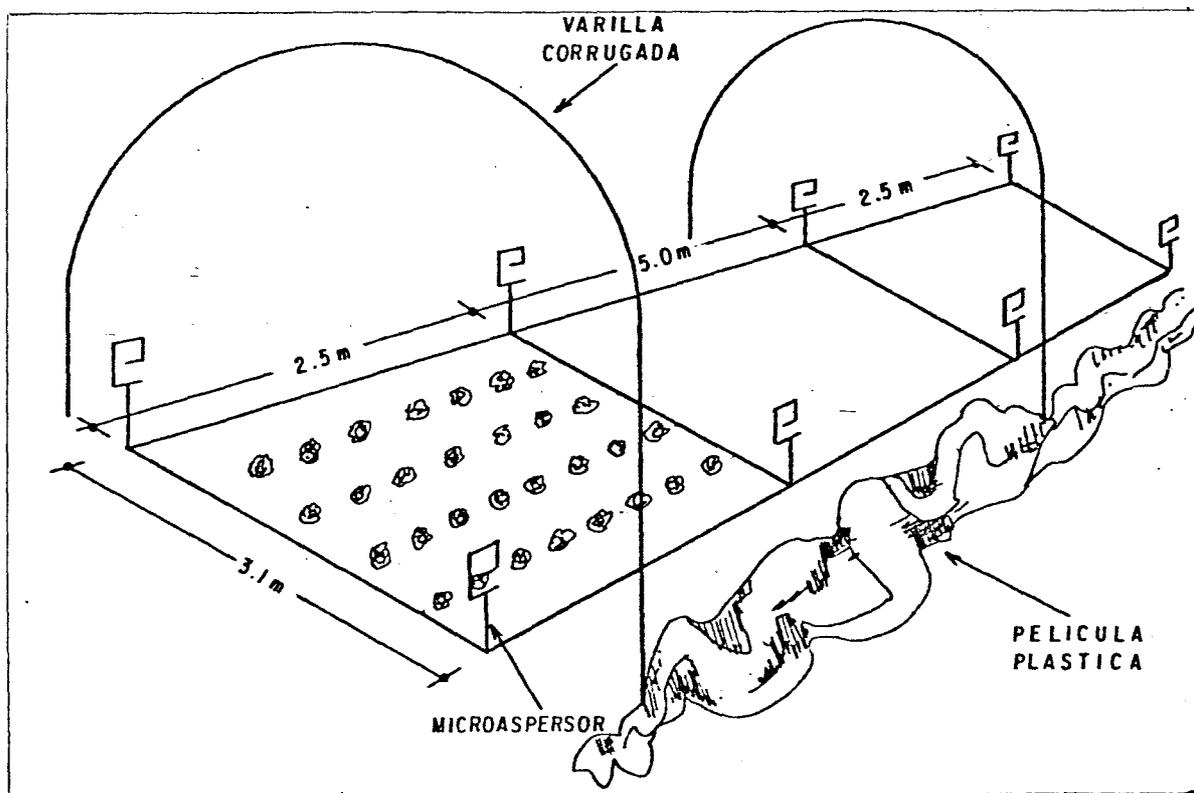
Cuadro 1. Propiedades Físicas del Suelo

Prof. (cm)	Textura	Da gr/cm ³	CC %	PMP %	HA mm	pH	CE mmhos/cm
0-20	M. Arcilloso	1.20	29.93	16.35	35.19	7.8	2.90
20-40	M. Arcilloso	1.21	29.58	16.03	33.05	7.9	0.95
40-60	M. Arcilloso	1.22	33.90	17.00	40.83	8.0	0.80

La textura fue analizada con el método de Bouyucos y la densidad aparente se midió utilizando la barrena de volumen conocido, balanza y estufa. De acuerdo a lo anterior el suelo se considera migajón arcilloso. La capacidad de campo y el punto de marchitez permanente fueron determinados en laboratorio mediante el método de ollas y membranas de presión.

Parcela Experimental

La parcela experimental tuvo las dimensiones de 3.1 por 2.5 metros y separada por otra similar para evitar movimiento de agua de una parcela a otra, en cada parcela se instalaron túneles de polietileno -- para evitar aportaciones por lluvia y así tener mayor control sobre el agua aplicada. Lo anterior, se puede apreciar en la figura 2. Cabe mencionar que el plástico estuvo siempre en la posición que se muestra ya que no se presentaron lluvias durante todo el ciclo de cultivo.



Factores y Niveles de Estudio

Factores de Estudio. Los factores de estudio se desarrollaron bajo tres etapas de desarrollo del frijol, Vegetativa (V), Floración (F) y Madurez (M). El criterio considerado fue que al tener un 50 por ciento de plantas con flor, terminó la etapa vegetativa e inició floración. Al tener un 50 por ciento de plantas con vaina de dos cm de largo terminó la etapa de floración e inició la etapa de madurez que a su vez terminó con el ciclo del cultivo (semilla totalmente desarrollada).

Niveles de Estudio. La cantidad de agua por aplicar se obtuvo a partir de la ecuación que rige el comportamiento de la retención de humedad del suelo y bajo el criterio de Escobar y Ramírez (1979), de la siguiente manera:

1. De los datos registrados por la olla y membrana de presión (P_s, T) se obtuvo por regresión la ecuación: $P_s = K T^n$ para las profundidades que se pretenden considerar (en este caso: 0-20, 20-40, 40-60 y 60-80 cm.)
2. Se integró cada ecuación desde 0.3 a 15 atm. Resultando el trabajo total desde capacidad de campo (límite inferior) hasta punto de marchitez permanente (límite superior).
3. El trabajo total se dividió entre el número de niveles (en este caso fueron cuatro) resultando el trabajo parcial equidistante.
4. El trabajo parcial equidistante se sustituyó como resultado de la integración dejando fijo el límite inferior para obtener el límite superior que fue la tensión (T) del primer tratamiento.

5. El trabajo parcial equidistante se duplica y se repite el paso 4 para obtener el segundo tratamiento, este proceso es sucesivo hasta cumplir con el número de niveles y profundidades.
6. Los tratamientos resultantes para cada profundidad se promediaron para obtener el tratamiento que se aplicó en el experimento.

Cuadro 2. Modelos de regresión para el comportamiento de la retención de humedad.

Estrato (cm)	Modelo	R ²
0-20	Ps = 24.85 T ^{-0.1545}	0.997
20-40	Ps = 20.04 T ^{-0.1512}	0.996
40-60	Ps = 24.62 T ^{-0.1592}	0.990
60-80	Ps = 27.35 T ^{-0.1785}	0.997

Este procedimiento aplicado para los datos del estrato 0-20 en el cuadro 2 resultó:

$$1. \text{Ps} = 24.85 \text{ T}^{-0.1545}$$

$$2. \text{Wtotal} = \int_{0.3}^{15} 24.85 \text{ T}^{-0.1545} \text{ dT}$$

$$\text{Wtotal} = \left[29.39 \text{ T}^{0.8455} \right]_{0.3}^{15}$$

$$\text{Wtotal} = 29.39 (15)^{0.8455} - 29.39 (0.3)^{0.8455}$$

$$\text{Wtotal} = 290.12 - 10.61$$

$$\text{Wtotal} = 279.5 \frac{\text{Atm} \cdot \text{kgw}}{\text{kgs}}$$

3. En este caso se manejaron cuatro niveles. Por tanto, el trabajo parcial equidistante (WPE) será:

$$WPE = 279.5/4 = 69.87$$

4. La tensión del tratamiento uno (T_1) será:

$$69.87 = 29.39 (T_1)^{0.8455} - 29.39 (0.3)^{0.8455}$$

$$T_1 = 3.29 \text{ Atm}$$

5. La tensión del tratamiento dos (T_2) será:

$$69.87 (2) = 29.39 (T_2)^{0.8455} - 29.39 (3)^{0.8455}$$

$$T_2 = 6.89 \text{ Atm}$$

Así sucesivamente se obtuvo el cuadro 3; de esta forma, los niveles de estudio sometidos en este experimento fueron los que se muestran en el cuadro 4 y representados en la figura 3.

Cuadro 3. Valores de la tensión y su correspondiente contenido de humedad.

Profundidad	T (Atm)	T_1	T_2	T_3	T_4
	Ps (%)	Ps1	Ps2	Ps3	Ps4
0-20	0.30	3.29	6.89	10.82	15.00
	29.93	20.67	18.44	17.20	16.35
20-40	0.30	3.39	6.82	10.75	15.00
	31.13	21.11	18.67	17.32	16.46
40-60	0.30	3.25	6.80	10.69	15.00
	29.58	20.40	18.14	16.88	16.03
60-80	0.30	3.64	6.77	10.74	15.00
	33.90	22.23	19.44	17.90	17.00
Promedio 0-80	0.30	3.39	6.82	10.75	15.00
	31.13	21.10	18.67	17.32	16.46

Cuadro 4. Niveles de estudio del experimento.

Nivel	% de Humedad	Lámina (mm)
V ₁	16.46 - 17.32	9.3
V ₂	16.46 - 18.67	14.0
V ₃	16.46 - 21.10	50.0
V ₄	16.46 - 31.30	150.0

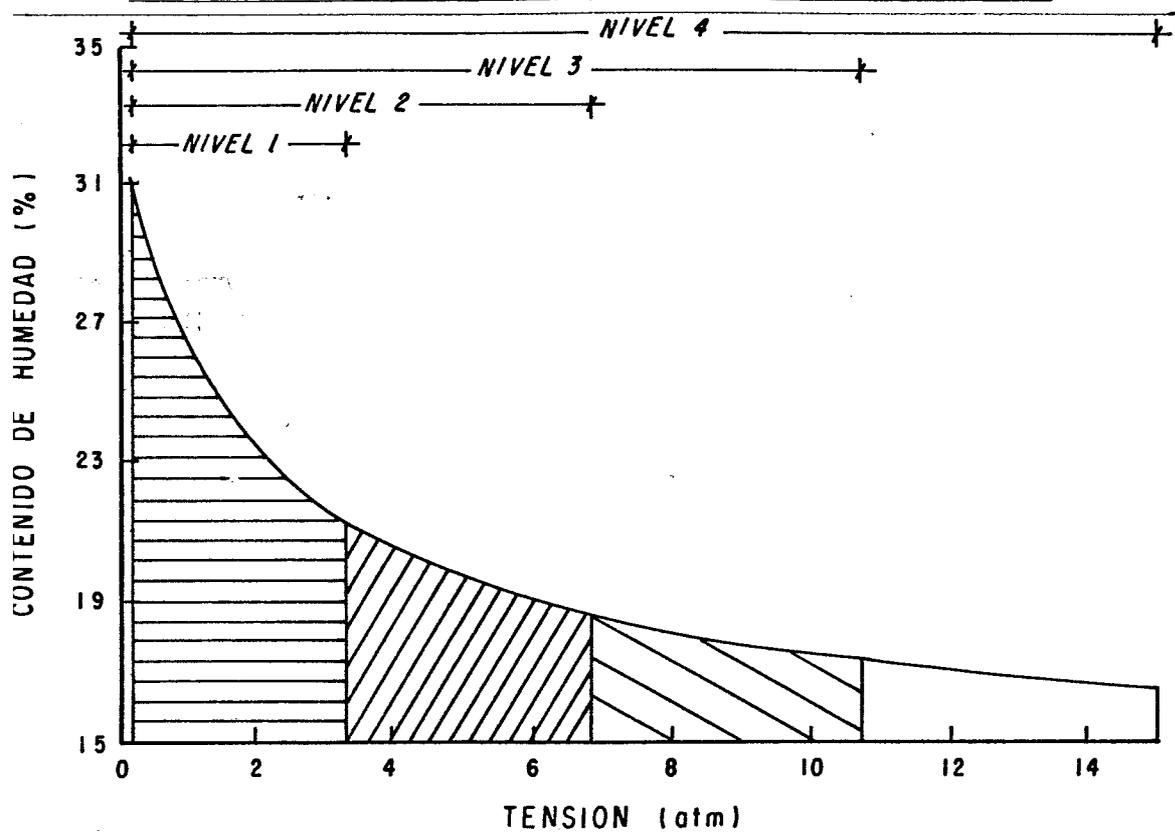


Figura 3. Niveles de estudio representados en gráfica.

Tomando en cuenta que las láminas de riego por aplicar resultaron muy pequeñas, se utilizó un sistema de microaspersión para su aplicación.

Diseño Experimental

Debido a que al utilizar un diseño experimental 4^3 es muy -

laborioso, se optó por la matriz San Cristobal propuesta por Rojas (1979) que permite reducir los tratamientos de 64 a 12 que analizan todo el intervalo de combinaciones posibles. Los tratamientos resultantes son los que se presentan a continuación en el cuadro 5. y uno adicional.

Cuadro 5. Tratamientos resultantes de la matriz San Cristobal

Tratamiento	Etapa Fenológica		Madurez
	Vegetativa	Floración	
1	V ₁	V ₁	V ₁
2	V ₃	V ₁	V ₁
3	V ₁	V ₃	V ₁
4	V ₃	V ₃	V ₁
5	V ₁	V ₁	V ₃
6	V ₃	V ₁	V ₃
7	V ₁	V ₃	V ₃
8	V ₃	V ₃	V ₃
9	V ₂	V ₂	V ₂
10	V ₄	V ₂	V ₂
11	V ₂	V ₄	V ₂
12	V ₂	V ₂	V ₄
13	V ₄	V ₄	V ₄

Trabajos de Campo

Preparación del Terreno, Consistió en un barbecho y paso de rastra con-cruza.

Siembra y Fertilización. La siembra fue el 8 de agosto de 1988, 1a -

variedad sembrada fue la Pinto Laguna 80 en la densidad de 140,000 plantas/ha. la dosis de fertilización fue 50-40-00 que se aplicó al momento de la siembra.

Labores de Cultivo. Se realizó un deshierbe con azadón y una escarda cuando así se requirió. La mosquita blanca se combatió con insecticida.

Riegos. En base a los muestreos, los riegos se dieron cuando el potencial mátrico del suelo ponderado fuera lo más próximo al punto de marchitez permanente (15 Atm.)

Datos de Clima. Durante el desarrollo del cultivo se tomaron los datos requeridos para la evaluación de los modelos (Reddy y Palacios) los cuales se anexan.

Medición del Consumo de Agua. Para obtener la evolución de la humedad en el suelo y un patrón de comparación con la estimada por los modelos-mencionados; el suelo se muestreó usando el método gravimétrico las veces necesarias. Cabe aclarar, que el punto de marchitez permanente (PMP) se utilizó solo como un punto de referencia (15 atm) para la definición del momento del riego.

RESULTADOS

Duración del Ciclo de Cultivo

Las etapas consideradas en este experimento se presentaron en todas las parcelas con diferencia de uno o cuando mucho dos días. Es decir, tanto en tratamientos secos como húmedos las etapas de desarrollo se presentaron al mismo tiempo con la distribución siguiente: Para el establecimiento de los tratamientos se requirieron 20 días después de la siembra, la etapa vegetativa se presentó durante 24 días, la etapa de floración se mantuvo 20 días y la de madurez 28 días; haciendo un total de 92 días en todo el ciclo.

Número de Riegos y Láminas Consumidas

Los números de riegos aplicados oscilaron de cuatro a seis en los tratamientos y las láminas consumidas variaron en un rango de 166 mm como se puede apreciar en el cuadro 6.

Evolución de la Humedad en el Suelo

Los resultados del muestreo gravimétrico de la humedad inducida por el sistema de riego utilizado (micro-aspersión) para las capas 0-20, 20-40, 40-60 y 60-80 cm se muestran en el cuadro 7 para el tratamiento uno al cual, le correspondió el volumen más pequeño en las tres fases de desarrollo (V1,V1,V1). Se hicieron 16 muestreos con la finalidad de rastrear el momento de riego, la variación del contenido de humedad por capa se puede apreciar en la figura 4 donde se distinguen las líneas

del punto de marchitez permanente y del 50 por ciento de la humedad aprovechable, cabe mencionar que el 55 por ciento de los puntos en la capa 0-20 estuvieron por debajo del punto de marchitez permanente; mientras que, las restantes de todas las capas se mantuvieron con déficit hídrico al concentrarse por debajo del 50 por ciento de la humedad aprovechable.

Cuadro 6. Número de riegos y láminas consumidas en cada tratamiento.

Tratamiento	Nº de Riegos	Lámina Consumida (mm)
1	6	116.75
2	6	157.14
3	4	136.90
4	4	185.85
5	6	123.87
6	5	151.55
7	4	151.44
8	4	183.26
9	4	177.31
10	4	165.19
11	4	200.07
12	4	167.78
13	4	282.99

Otro tratamiento que resultó con un nivel de humedad durante las tres fases de desarrollo fue el nueve (V2, V2, V2) en el cual, se realizaron 12 muestreos cuyos resultados se presentan en el cuadro 8 para las cuatro capas consideradas. En la figura 5 se muestra la evolución del contenido de humedad donde se distinguen que el 50 por ciento de los puntos en la capa 0-20 quedaron debajo de la línea del punto de marchitez permanente y el restante de los puntos de todas las capas se mantuvo con déficit hídrico con excepción de un solo punto en la capa 20-40.

Cuadro 7. Evolución de la humedad observada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del Tratamiento Uno			
	0-20	20-40	40-60	60-80
1	52.01	55.44	57.22	57.96
9	37.10	47.99	48.51	50.51
15	45.07	49.34	51.80	51.72
20	35.69	44.29	47.68	48.64
24	38.81	44.36	47.34	50.94
29	36.60	43.61	45.87	45.67
36	41.50	44.89	45.31	48.13
49	37.73	42.66	47.24	44.41
50	37.34	44.29	46.07	47.46
57	39.10	43.95	46.63	48.74
62	37.03	39.76	44.41	46.90
65	40.42	45.18	47.58	49.76
69	34.97	41.83	44.87	43.22
76	37.51	44.17	45.90	49.08
79	45.12	45.42	45.26	45.86
92	32.81	40.00	40.63	42.45

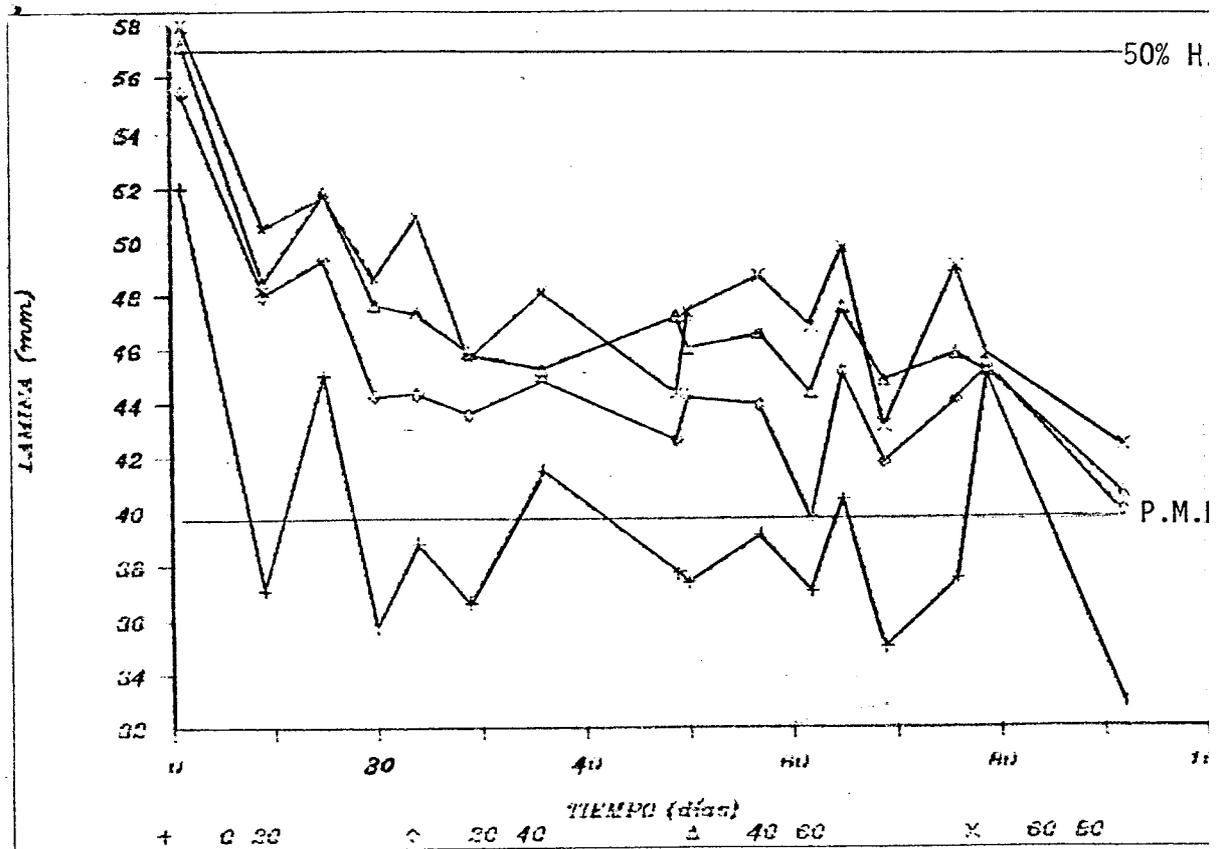


Figura 4. Evolución de la humedad del tratamiento uno.

Cuadro 8. Evolución de la humedad observada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del Tratamiento Nueve			
	0-20	20-40	40-60	60-80
1	52.01	55.44	57.22	57.96
9	37.10	47.99	48.51	50.51
15	45.07	49.34	51.80	51.72
20	35.69	44.29	47.68	48.64
24	41.88	73.37	56.07	57.23
49	38.98	42.08	43.14	45.76
51	48.82	46.37	46.82	47.60
62	40.73	40.39	41.46	42.93
69	33.96	40.80	42.43	45.01
76	35.78	41.48	46.63	45.76
79	55.82	42.98	43.60	46.22
92	33.24	41.21	41.89	41.12

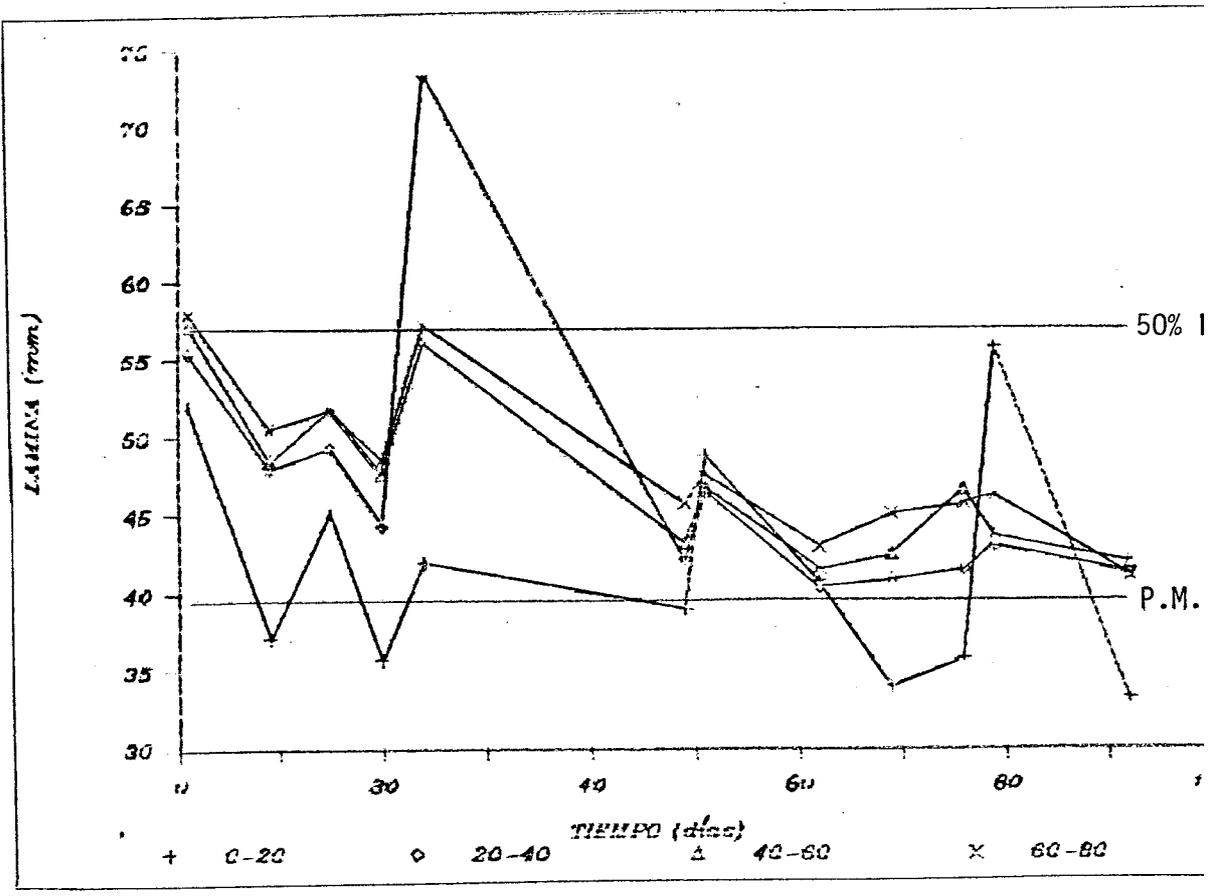


Figura 5. Evolución de la humedad del tratamiento nueve.

El tratamiento ocho también resultó con un nivel de estudio constante durante las tres fases de desarrollo (V3, V3, V3) y los resultados de 11 muestreos se presentan en el cuadro 9 cuya correspondiente gráfica (figura 6) para las cuatro capas muestra que solo cuatro puntos se presentaron por debajo del punto de marchitez permanente para la capa 0-20 y - que la mayoría para todas las capas se presentó con déficit hídrico.

Cuadro 9. Evolución de la humedad observada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del Tratamiento Ocho			
	0-20	20-40	40-60	60-80
1	52.01	55.44	57.22	57.96
9	37.10	47.99	48.51	50.51
15	45.07	49.34	51.80	51.72
20	35.69	44.29	47.68	48.64
24	47.59	50.41	64.27	65.82
43	41.04	42.28	45.14	45.50
49	43.54	43.97	43.60	46.22
51	61.34	48.86	50.31	52.22
76	35.40	42.93	46.80	45.30
80	65.52	44.43	45.70	46.42
92	36.24	43.78	45.46	43.54

El tratamiento trece fue el más húmedo (Y4, Y4, Y4), los resultados del muestreo gravimétrico se muestran en el cuadro 10 y es posible distinguir el abatimiento de la humedad en la figura 7 donde después del día 20 (inicio de tratamientos) se presenta la oscilación de déficit y no déficit resultando el último en un 29 por ciento (21 días) del total de días bajo tratamiento (92 días).

Los demás tratamientos no se describen por estar en el entorno de los mencionados. Sin embargo, para su verificación se presenta en el apéndice A.

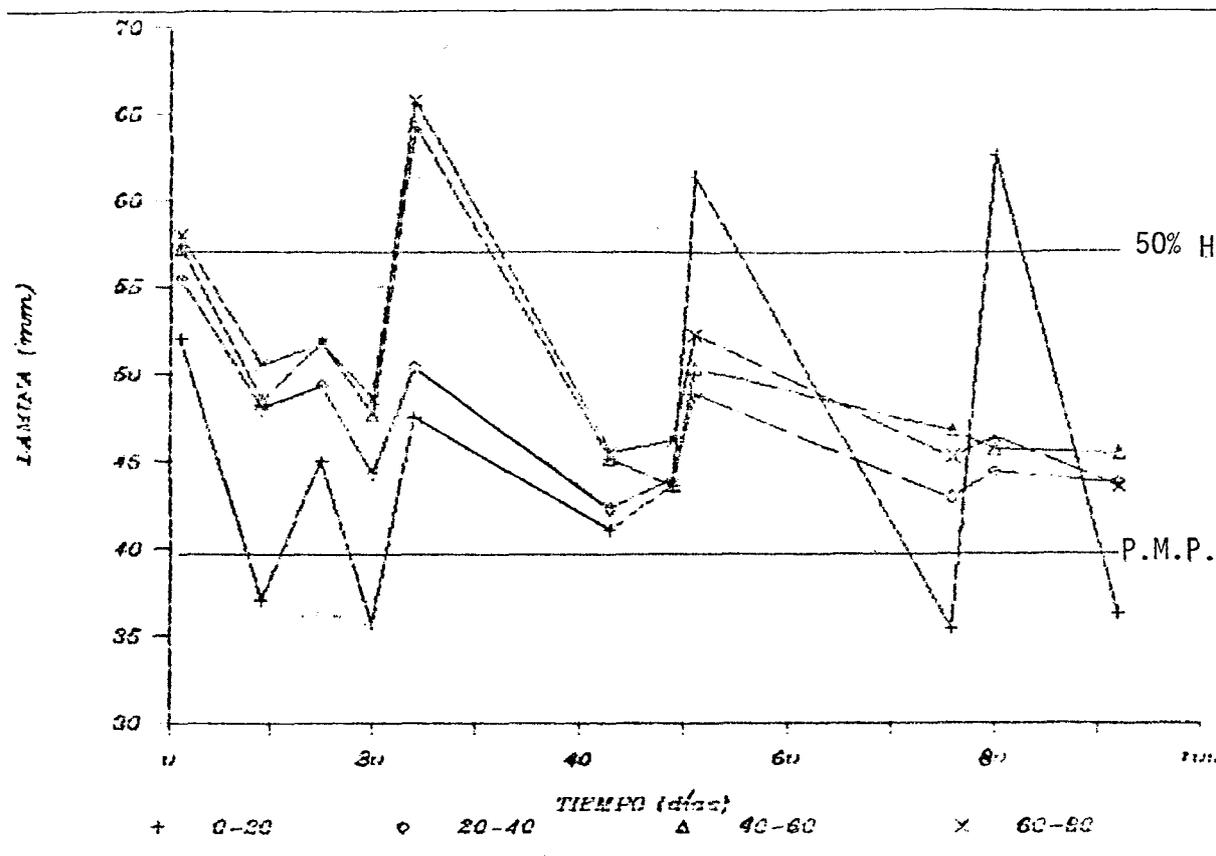


Figura 6. Evolución de la humedad del tratamiento ocho

Cuadro 10. Evolución de la humedad observada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del Tratamiento Trece			
	0-20	20-40	40-60	60-80
1	52.01	55.44	57.22	57.96
9	37.10	47.99	48.51	50.51
15	45.07	49.34	51.80	51.72
20	35.69	44.29	47.68	48.64
24	63.19	65.73	66.22	61.95
43	45.00	49.95	50.58	50.14
49	44.90	47.94	49.41	49.78
51	73.58	69.45	69.56	65.24
55	55.22	57.31	59.93	54.62
76	41.09	48.04	51.61	53.05
80	72.82	69.58	75.18	68.75
92	47.83	52.34	56.66	55.76

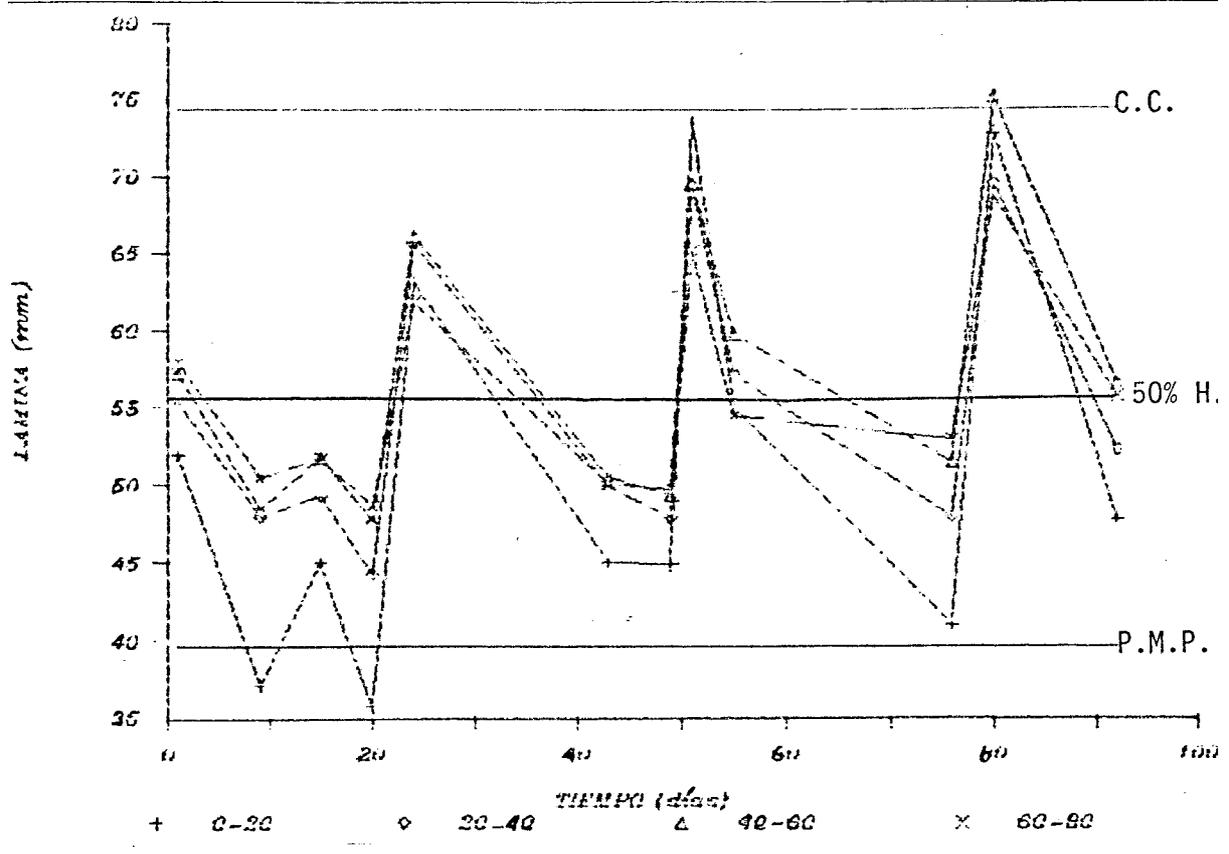


Figura 7. Evolución de la humedad del tratamiento trece.

Modelos para la Estimación de la Evapotranspiración del Cultivo

Con el propósito de obtener una metodología que permita predecir el comportamiento del balance de humedad en cultivos sometidos a estrés hídrico se probaron por una parte, la metodología de Reddy (1983) y por otra parte, la propuesta por Palacios (1981). A manera de comparación, se presentan los resultados de los tratamientos con un nivel de estudio constante en las tres fases de desarrollo planteadas y considerando la capa de suelo 0-60 que presentó mayor movimiento de agua: los datos resultantes del tratamiento uno (V1, V1, V1) se pueden ver en el cuadro 11, donde se presenta la evolución de la humedad del suelo por capa y la total (0-60) así como la estimada por los modelos mencionados. En la

figura 8 se aprecia con mejor detalle el comportamiento de lo observado con el muestreo gravimétrico y sus estimaciones, donde se distingue que Reddy (1983) subestima durante los 92 días considerados; mientras que Palacios (1981) hace lo contrario durante los primeros 55 días.

En el cuadro 12 se presentan los datos del tratamiento nueve que le correspondió un nivel constante en las tres fases (V2, V2, V2). Al hacer gráficos dichos datos con el propósito de comparar los modelos estimadores (figura 9) es posible visualizar que el modelo Reddy (1983) continúa subestimado como en el caso anterior. Sin embargo, las diferencias con respecto a lo observado son menores que lo sobreestimado por Palacios (1981).

El tratamiento Ocho, también con nivel constante en las fases de desarrollo (V3, V3, V3) dio por resultados lo mostrado en el cuadro 13 que graficados en la figura 10 se aprecia lo mencionado en el párrafo anterior.

Otro tratamiento que mantiene la tendencia de los mencionados anteriormente fue el trece (V4, V4, V4) cuyos resultados se observan en el cuadro 14 y su correspondiente gráfica en la figura 11.

A continuación se presentan resultados de tratamientos con diferente nivel de estudio durante las fases de desarrollo donde es posible distinguir la misma tendencia mencionada anteriormente y corresponde a la información en los cuadros 15, 16 y 17; y sus gráficos en las figuras 12, 13 y 14 respectivamente.

La información total de los trece tratamientos dio una cantidad de 168 datos de muestreos gravimétricos; los cuales, al ser sometidos a una regresión lineal con respecto a la humedad estimada por los dos modelos mencionados resultó lo mostrado en el cuadro 18, cuyas gráficas se observan en las figuras 15 y 16 al respecto.

Cuadro 11. Evolución de la humedad del suelo y la estimada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del Tratamiento Uno			0-60	Reddy	Palacios
	0-20	20-40	40-60			
1	52.01	55.44	57.22	164.67	162.00	161.90
9	37.10	47.99	48.51	133.60	146.00	146.46
15	45.07	49.34	51.80	146.21	132.00	154.80
20	35.69	44.29	47.68	127.66	118.00	150.63
24	38.81	44.36	47.34	130.51	118.00	149.44
29	36.60	43.61	45.87	126.08	118.00	145.03
36	41.50	44.89	45.31	131.70	118.00	144.62
49	37.73	42.66	47.24	127.63	118.00	132.14
50	37.34	44.29	46.07	127.70	118.00	131.16
57	39.10	43.95	46.63	129.68	118.00	124.52
62	37.03	39.76	44.41	121.20	118.00	119.69
65	40.42	45.18	47.58	133.18	127.00	128.25
69	34.97	41.83	44.87	121.67	123.00	126.21
76	37.51	44.17	45.90	127.58	118.00	121.75
79	45.12	45.42	45.26	135.80	124.00	128.43
92	32.81	40.00	40.63	113.44	118.00	124.56

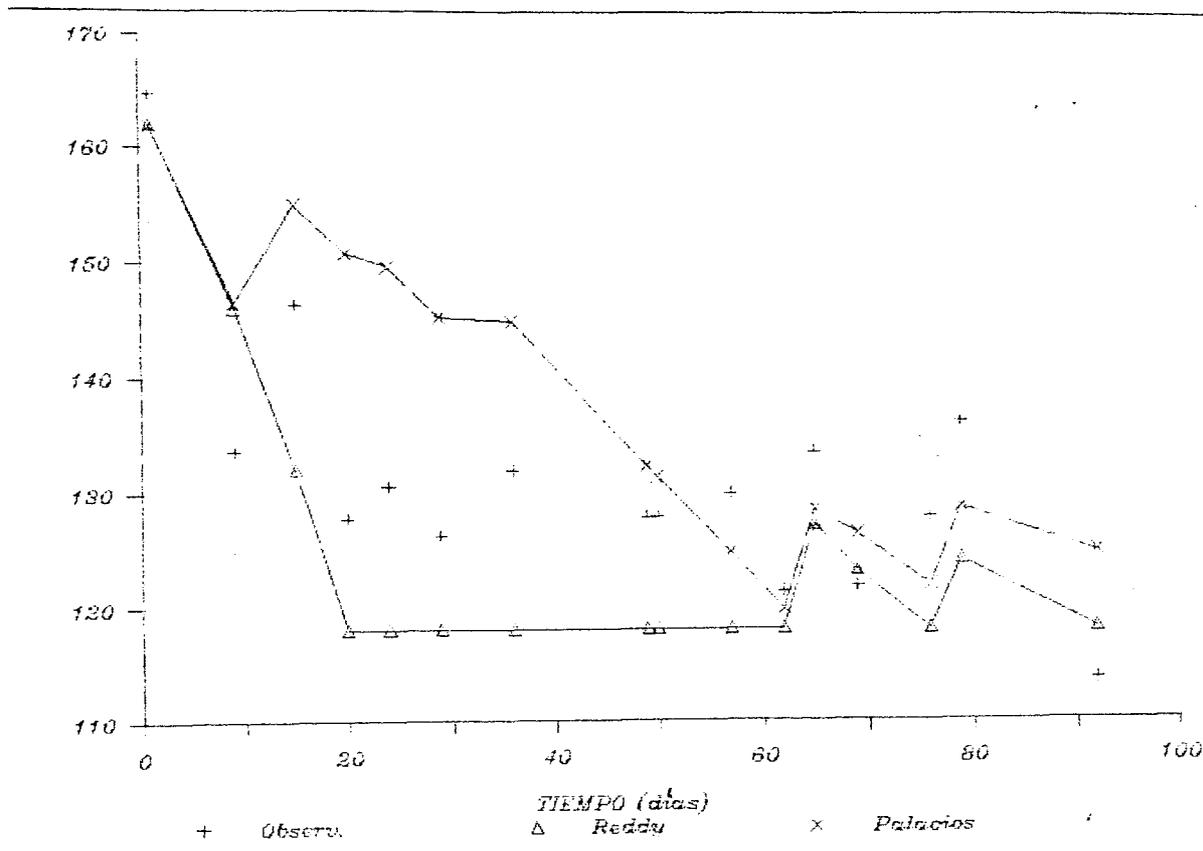


Figura 8. Comparación del consumo de agua del tratamiento uno.

Cuadro 12. Evolución de la humedad del suelo y la estimada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del Tratamiento Nueve					
	0-20	20-40	40-60	0-60	Reddy	Palacios
1	52.01	55.44	57.22	164.67	162.00	161.90
9	37.10	47.99	48.51	136.60	148.00	146.46
15	45.07	49.44	51.80	146.21	134.00	154.80
20	35.69	44.29	47.68	127.66	118.00	150.63
24	41.88	73.37	56.07	171.32	159.00	190.25
49	38.98	42.08	43.14	124.20	118.00	167.37
51	48.82	46.37	46.82	142.01	133.00	183.02
62	40.73	40.39	41.46	122.58	118.00	172.62
69	33.96	40.80	42.43	117.19	118.00	167.16
76	35.78	41.88	46.63	123.89	118.00	162.70
79	55.82	42.98	43.60	142.40	134.00	179.67
92	33.24	41.21	41.89	116.34	127.00	175.80

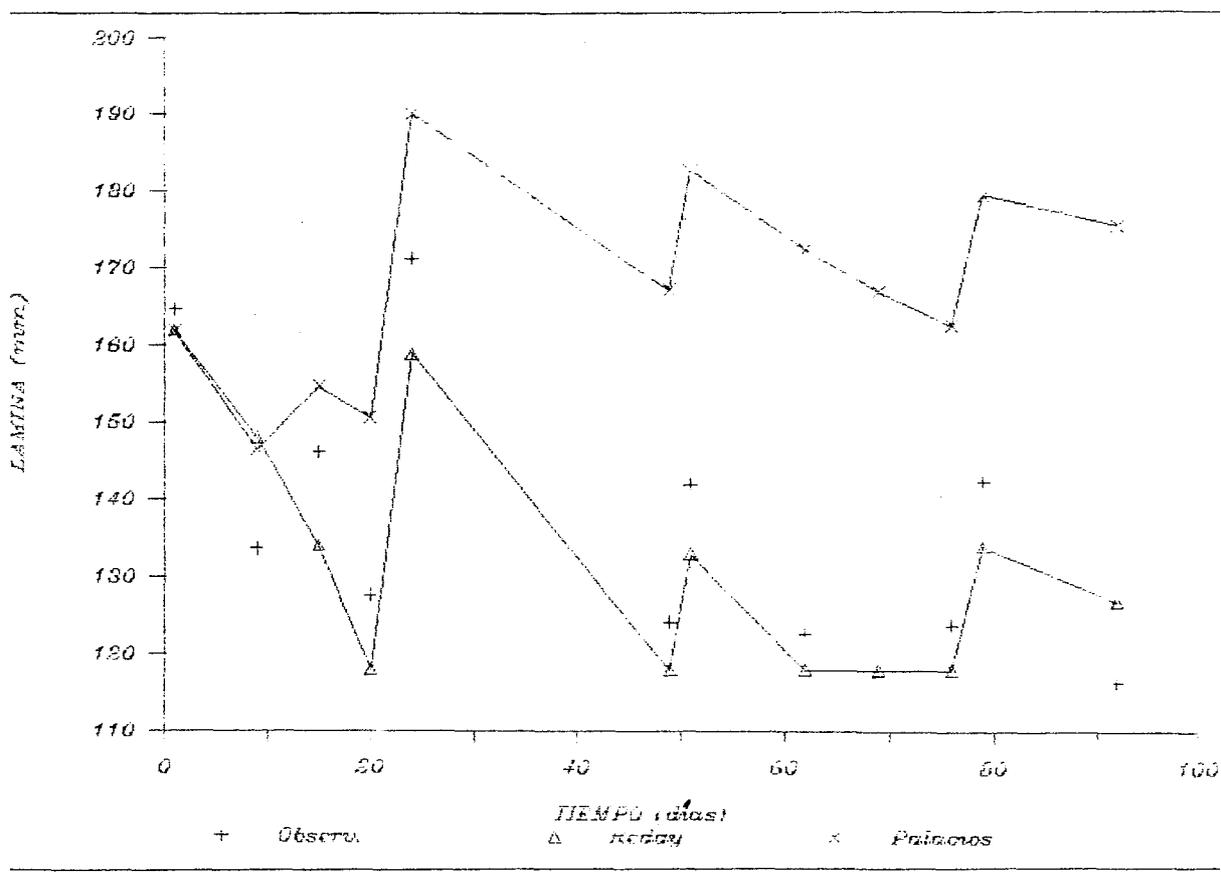


Figura 9. Comparación del consumo de agua del tratamiento nueve.

Cuadro 13. Evolución de la humedad del suelo y la estimada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del Tratamiento Ocho					
	0-20	20-40	40-60	0-60	Reddy	Palacios
1	52.01	55.44	57.22	164.67	162.00	161.90
9	37.10	47.99	48.51	133.60	148.00	146.46
15	45.07	49.34	51.80	146.21	124.00	154.80
20	35.69	44.29	47.68	127.66	118.00	150.63
24	47.59	50.41	64.27	162.27	200.00	215.19
43	41.04	42.28	45.14	128.46	138.00	199.15
49	43.54	43.97	43.60	131.11	124.00	192.32
51	61.34	48.86	50.31	160.51	149.00	215.19
76	35.40	42.93	46.80	125.13	118.00	194.87
80	62.52	44.43	45.70	152.65	143.00	215.19
92	36.24	43.78	45.46	125.48	137.00	211.79

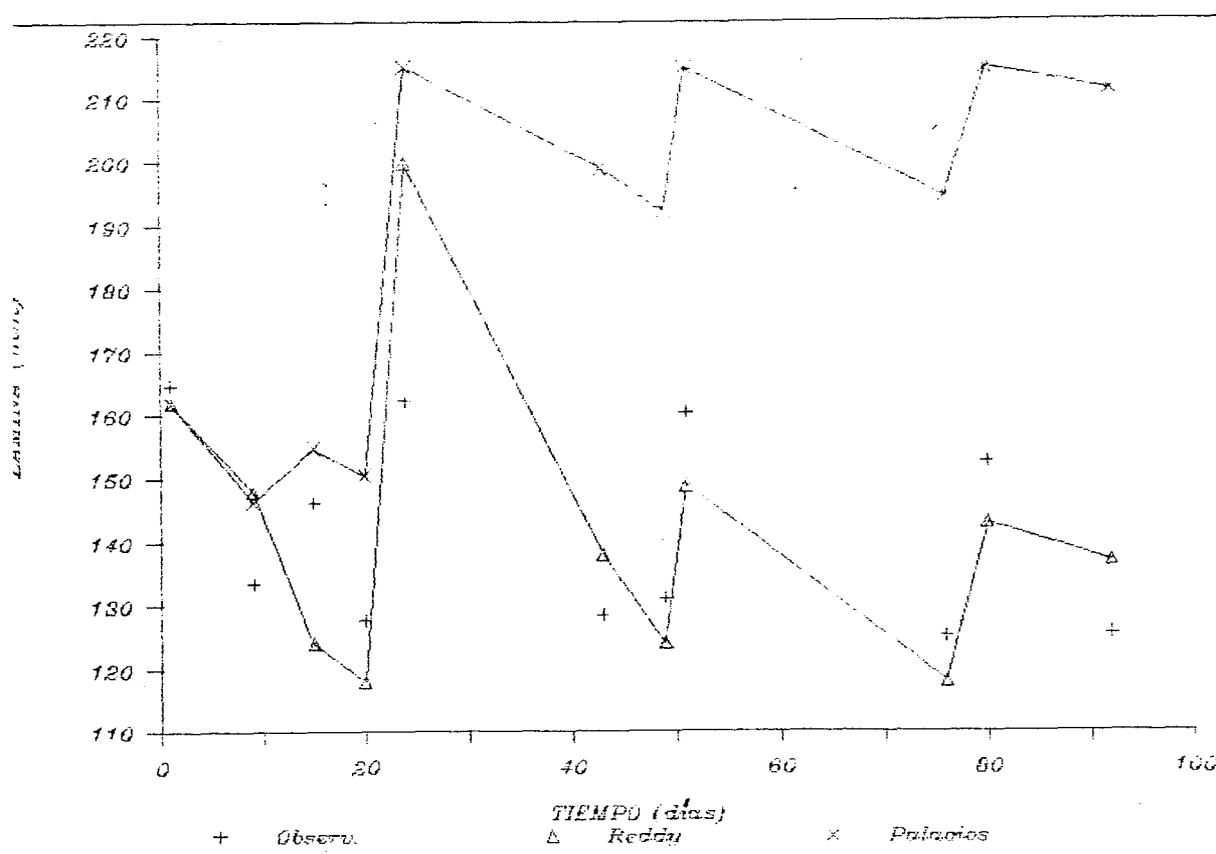


Figura 10. Comparación del consumo de agua del tratamiento ocho

Cuadro 14. Evolución de la humedad del suelo y la estimada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del Tratamiento Trece					
	0-20	20-40	40-60	0-60	Reddy	Palacios
1	52.01	55.44	57.22	164.67	162.00	161.90
9	37.10	47.99	48.51	133.60	148.00	146.46
15	45.07	49.34	51.80	146.21	134.00	154.80
20	35.69	44.29	47.68	127.66	118.00	150.63
24	63.19	65.73	66.22	195.14	183.00	214.07
43	45.00	49.95	50.58	145.53	120.00	198.85
49	44.90	47.94	49.41	142.25	118.00	191.19
51	73.58	69.45	69.56	212.59	185.00	215.19
55	55.22	57.31	59.93	172.46	178.00	211.17
76	41.09	48.04	51.61	140.74	153.00	194.87
80	72.82	69.58	75.18	217.58	215.00	215.19
92	47.83	52.34	56.66	156.83	209.00	211.79

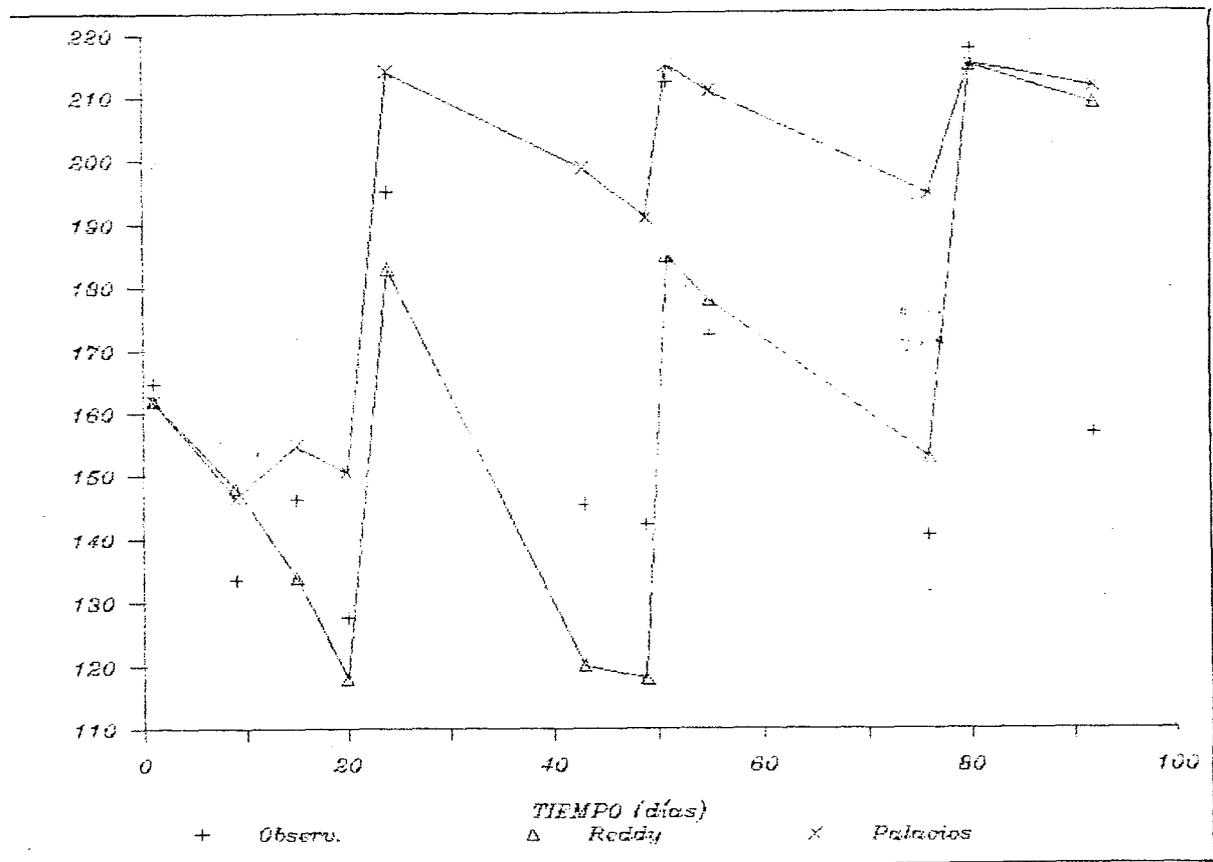


Figura 11. Comparación del consumo de agua del tratamiento trece.

Cuadro 15. Evolución de la humedad del suelo y la estimada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del Tratamiento Dos					
	0-20	20-40	40-60	0-60	Reddy	Palacios
1	52.01	55.44	52.22	164.67	162.00	161.90
9	37.10	47.99	48.51	133.60	148.00	146.46
15	45.07	49.34	51.80	146.21	134.00	154.80
20	35.69	44.29	47.68	127.66	118.00	150.63
24	47.59	50.41	64.27	162.27	150.00	181.20
43	44.74	46.61	49.31	140.66	118.00	170.78
49	40.61	47.02	44.92	132.55	118.00	163.94
50	42.53	46.51	49.90	138.94	122.00	169.25
58	42.41	45.76	47.12	135.29	118.00	161.28
62	40.03	43.83	45.38	129.24	118.00	157.77
65	44.62	44.58	50.14	139.34	125.00	165.46
69	37.49	44.48	51.46	133.43	121.00	162.41
76	36.62	41.82	46.58	125.02	118.00	157.95
79	44.64	45.62	50.39	140.65	131.00	172.04
92	38.94	43.03	44.90	126.91	124.00	168.71

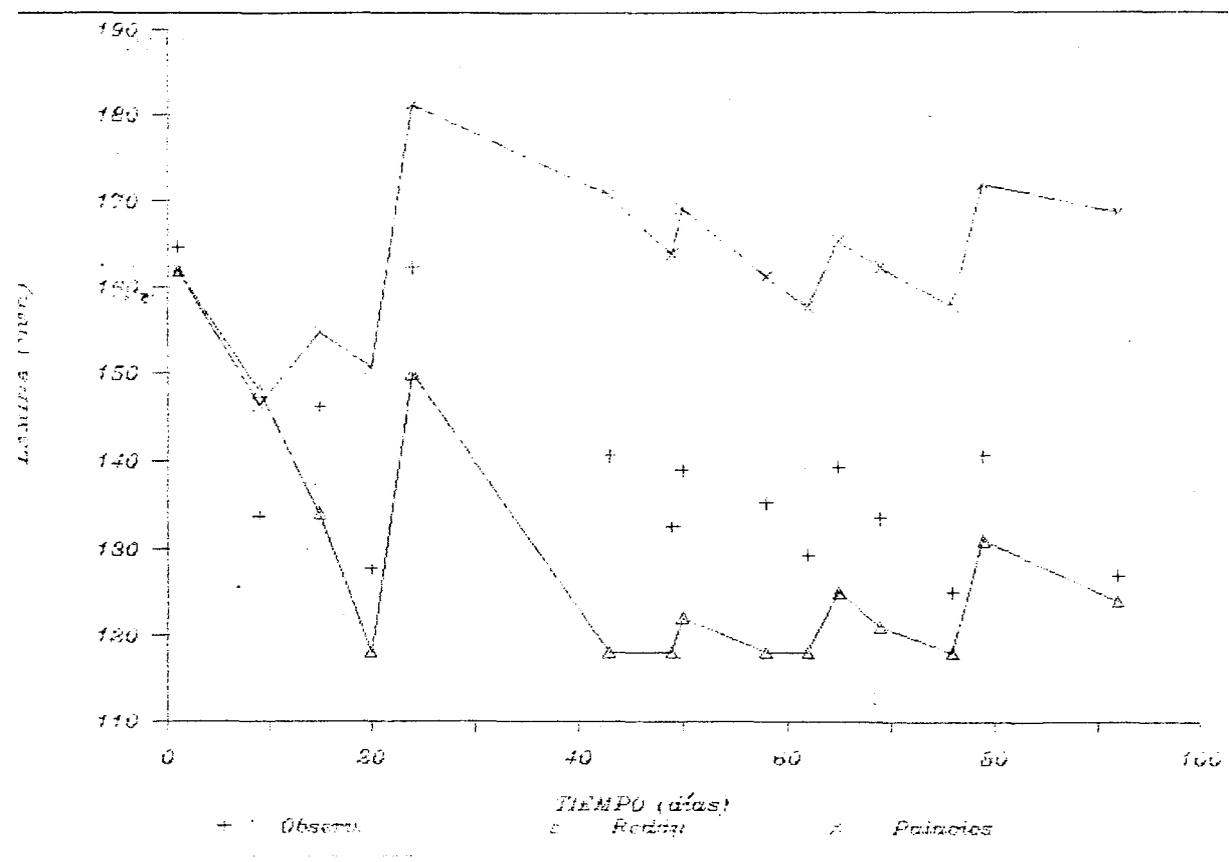


Figura 12. Comparación del consumo de agua del tratamiento dos.

Cuadro 16. Evolución de la humedad del suelo y la estimada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del Tratamiento Trés					
	0-20	20-40	40-60	0-60	Reddy	Palacios
1	52.01	55.44	57.22	164.67	162.00	161.90
9	37.10	47.99	48.51	133.60	148.00	146.46
15	45.07	49.34	51.80	146.21	134.00	154.80
20	35.69	44.29	47.68	127.66	118.00	150.63
24	38.81	44.36	47.34	130.51	118.00	149.44
29	40.56	43.10	44.29	127.95	118.00	145.03
36	40.37	44.09	44.04	128.50	118.00	139.01
49	41.38	46.15	48.24	135.77	118.00	126.56
51	66.17	50.22	51.70	168.09	147.00	156.72
76	39.94	47.63	47.43	135.00	118.00	136.40
79	45.82	45.98	51.44	143.24	124.00	143.10
92	32.62	45.30	47.12	125.04	118.00	139.23

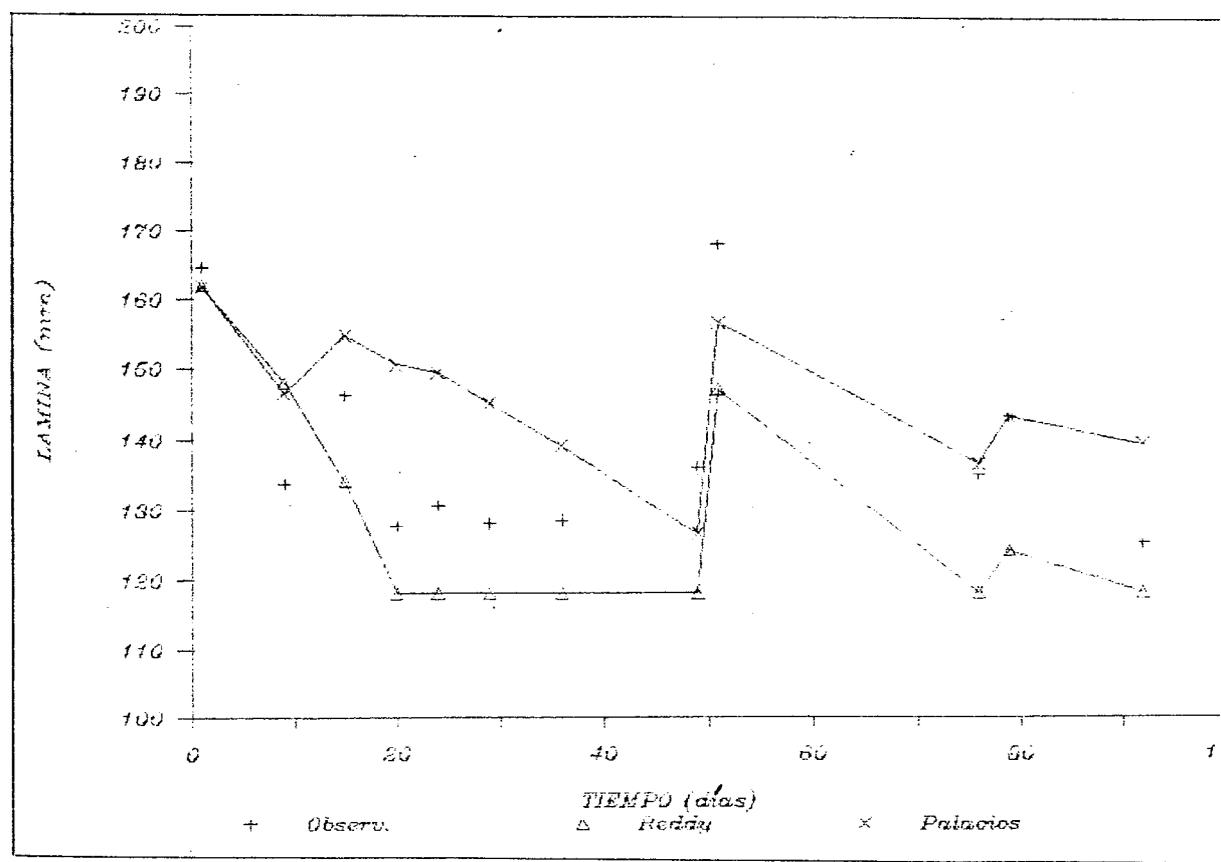


Figura 13. Comparación del consumo de agua del tratamiento tres.

Cuadro 17. Evolución de la humedad del suelo y la estimada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del Tratamiento Doce					
	0-20	20-40	40-60	0-60	Reddy	Palacios
1	52.01	55.44	57.22	164.67	162.00	161.90
9	37.10	47.99	48.51	133.60	148.00	146.46
15	45.07	49.34	51.80	146.21	134.00	154.80
20	35.69	44.29	47.68	127.66	118.00	150.63
24	41.88	49.32	56.07	147.27	135.00	166.20
49	37.54	42.96	44.63	125.13	118.00	143.32
51	45.36	46.20	50.85	142.41	132.00	158.44
62	37.54	42.16	44.82	124.52	118.00	148.04
69	36.00	41.29	42.65	119.94	118.00	142.58
76	37.20	40.37	43.82	121.39	118.00	138.12
80	66.67	72.24	69.76	208.67	203.00	215.19
92	49.54	58.06	56.71	164.31	196.00	211.79

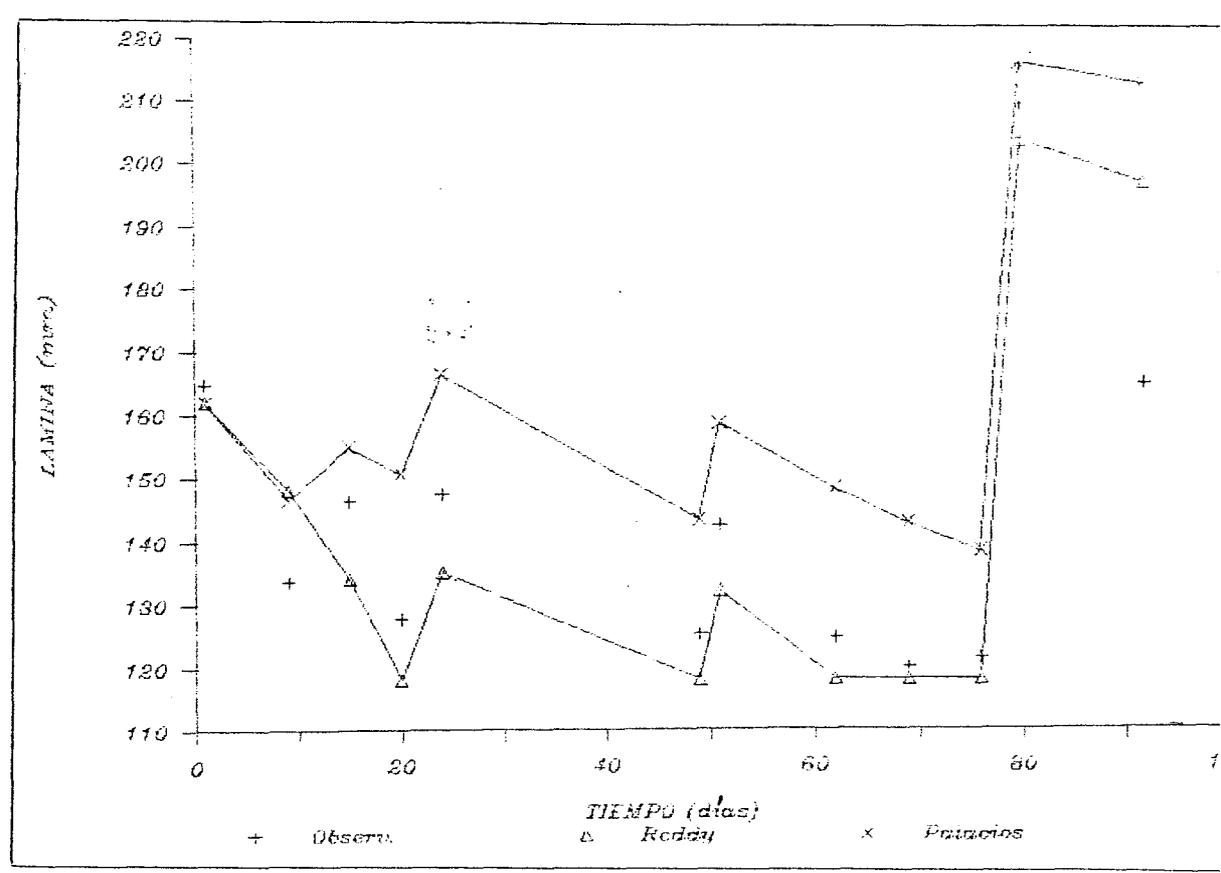


Figura 14. Comparación del consumo de agua del tratamiento doce.

Cuadro 18. Regresiones lineales de los modelos de simulación de la evolución del consumo de agua.

Párametros	Reddy	Palacios
Constante	-0.2197	55.7220
Err std de y Est	12.8094	19.2076
R al cuadrado	0.6624	0.3523
N° de observaciones	168	168
Grados de libertad	166	166
Coficiente(s) x	0.9540	0.7532
Err std de coef.	0.0528	0.0792

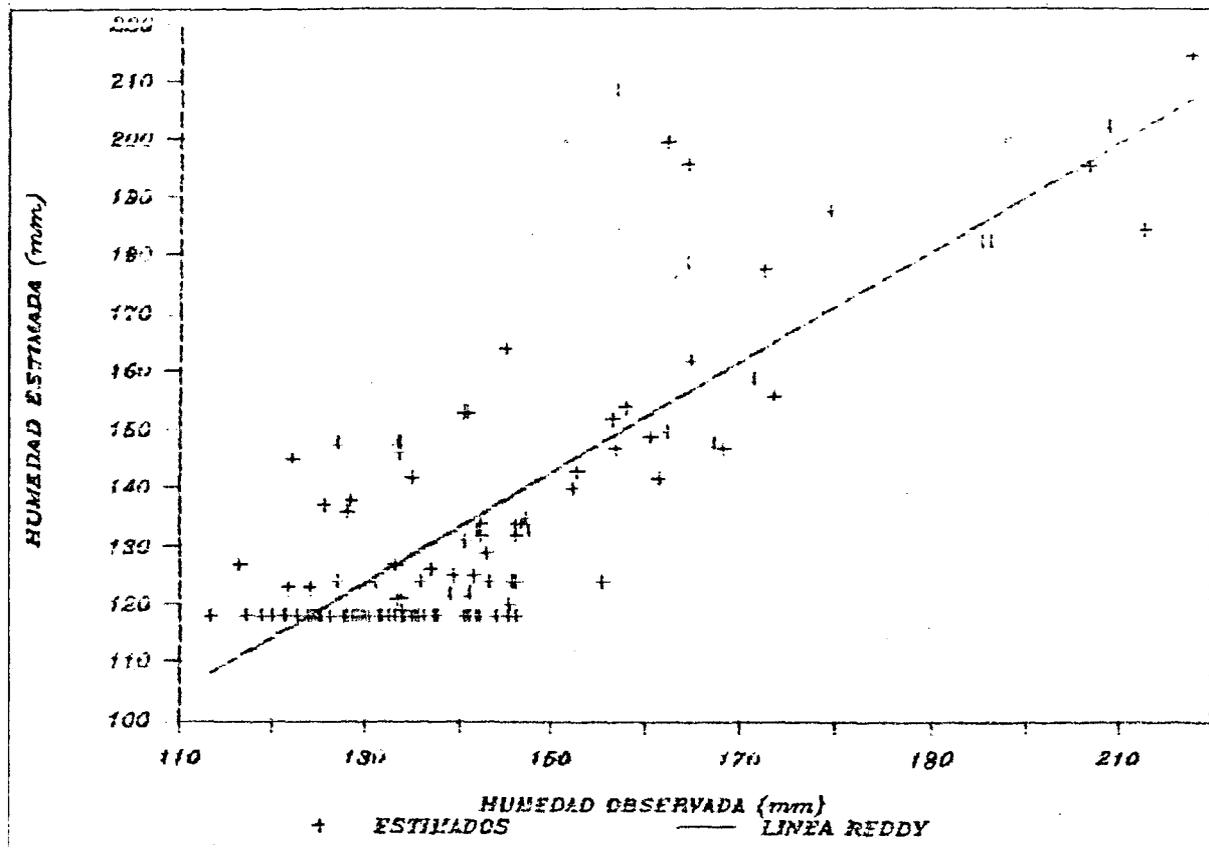


Figura 15. Ajuste del modelo de Reddy para 168 datos.

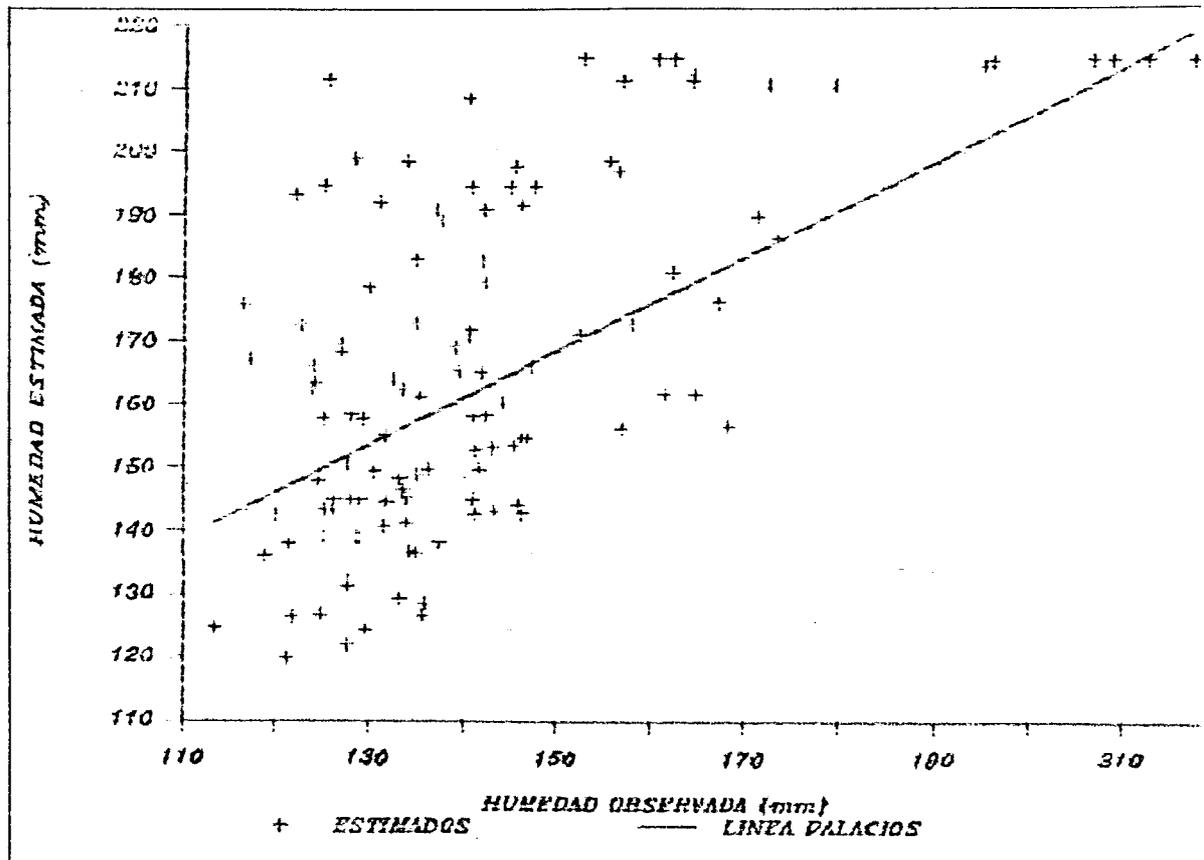


Figura 16. Ajuste del modelo de Palacios para 168 datos.

Rendimiento de Grano

El mes de agosto concentró la incidencia de plagas y se tuvo que controlar con aplicaciones continuas de insecticida (cada cuatro días) - ya que no se pudieron erradicar completamente y con la finalidad de salvar el rendimiento se utilizó un insecticida que aplicado al suelo se-

trasloca a la planta y bloquea la incidencia del gusano barrenador.

Por lo anterior, los rendimientos no fueron los esperados o resultaron más bajos que los normales. Sin embargo, el resultado experimental se puede considerar bueno como se aprecia en el cuadro 19, donde se muestra la respuesta del cultivo por tratamiento y por repetición. En el cuadro 20 se presenta el análisis de varianza para el rendimiento resultando con diferencia altamente significativa al 0.01 de nivel en el tratamiento y sin significancia en la repetición o block.

Cuadro 19. Rendimientos resultantes del experimento (gr/planta)

Tratamiento	R e p e t i c i ó n			Media
	1	2	3	
1	0.000	0.000	0.000	0.000
2	1.000	1.000	1.250	1.083
3	3.694	2.330	1.857	2.884
4	3.222	3.545	3.383	3.383
5	0.950	1.700	1.857	1.521
6	2.557	2.290	2.567	2.439
7	4.694	0.833	2.763	2.763
8	2.500	3.759	4.500	3.586
9	1.350	1.750	1.540	1.540
10	2.986	2.290	4.318	3.198
11	2.500	2.937	3.375	2.937
12	3.275	1.369	2.322	2.322
13	4.000	3.606	4.603	4.070
Media	2.516	2.108	2.697	

Cuadro 20. Análisis de varianza del rendimiento de frijol

Fuente	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Cuadrado Medio	F Calculada	F(0.01) Tablas
Tratamiento	46.333	12	3.861	6.754	3.03**
Repetición	2.365	2	1.183	2.068	5.61 NS
Error	13.721	24	0.572		
Total	62.420	38			

Modelos para Estimar el Rendimiento del Cultivo
en Función de los Índices de Sequía

Humedad Aprovechable Residual. Con el propósito de encontrar una respuesta del cultivo a la sequía inducida se evaluó a partir de los muestreos, la humedad aprovechable residual promedio ponderada en cada fase de desarrollo y que es posible verificar en los resultados del cuadro 21. En dichos datos se tienen los valores para los tratamientos 1, 8, 9 y 13 que se describieron en apartados anteriores y en esta parte también conservar la tendencia (mínimo para el tratamiento 1, máximo para el tratamiento - 13) con excepción de los tratamientos 8 y 9 en la etapa vegetativa. Pero, con diferencia mínima; con respecto al rendimiento la respuesta es más clara.

Al utilizar la técnica de la regresión polinomial de los valores del rendimiento en grano con respecto a la humedad aprovechable residual promedio ponderada se obtuvo el siguiente modelo:

$$RG = b_0 + b_1 V + b_2 F + b_3 M + b_4 V^2 + b_5 F^2 + b_6 M^2 + b_7 VF + b_8 FM + b_9 VM + b_{10} VFM \quad \dots \quad 8$$

donde:

RG = Rendimiento de grano

V = Humedad aprovechable residual en la etapa vegetativa (mm)

F = Humedad aprovechable residual en la etapa de floración (mm)

M = Humedad aprovechable residual en la etapa de madurez (mm)

$$b_0 = -1876.155$$

$$b_5 = 1.332$$

$$b_1 = 199.590$$

$$b_6 = -4.051$$

$$b_2 = 146.160$$

$$b_7 = -10.272$$

$$b_3 = 365.940$$

$$b_8 = -33.181$$

$$b_4 = -3.450$$

$$b_9 = -29.175$$

$$b_{10} = 3.133$$

Los parámetros estadísticos para este modelo fueron $R^2 = 0.850$, $R = 0.922$ y un error estándar de 153.18. Al hacer la prueba de Durbin - Watson resulta $d = 1.658$ lo cual indica que no existe correlación positiva como tampoco negativa del error estocástico para un nivel de confianza de 0.01; los valores estimados del rendimiento de grano por este modelo y los observados fueron comparados mediante regresión lineal, - resultando lo mostrado en el cuadro 22.

La regresión polinomial del rendimiento relativo con respecto a la humedad aprovechable residual promedio ponderada para cada etapa dio como resultado:

$$RR = b_0 + b_1V + b_2F + b_3M + b_4V^2 + b_5F^2 + b_6M^2 + b_7VF + b_8FM + b_9VM + b_{10}VFM \quad \dots 9$$

donde:

RR = Rendimiento relativo

$$b_0 = -2.992 \quad b_5 = 0.001$$

$$b_1 = 0.307 \quad b_6 = -0.006$$

$$b_2 = 0.243 \quad b_7 = -0.016$$

$$b_3 = 0.569 \quad b_8 = -0.050$$

$$b_4 = 0.004 \quad b_9 = -0.046$$

$$b_{10} = 0.005$$

Cuadro 21. Humedad aprovechable residual promedio ponderada (%)

Tratamiento	E T A P A S			RENDIMIENTOS	
	Veg.	Flor.	Mad.	kg/ha	Relativo
1 (V1,V1,V1)	6.49	3.57	3.54	0.00	0.00
2 (V3,V1,V1)	8.94	5.93	3.69	154.71	0.27
3 (V1,V3,V1)	6.60	11.17	6.54	375.29	0.65
4 (V3,V3,V1)	8.15	10.48	7.99	483.29	0.83
5 (V1,V1,V3)	7.16	7.37	7.77	217.29	0.37
6 (V3,V1,V3)	9.39	7.51	9.42	353.00	0.61
7 (V1,V3,V3)	6.73	7.49	8.16	394.71	0.68
8 (V3,V3,V3)	8.30	8.94	7.57	512.29	0.88
9 (V2,V2,V2)	9.82	3.77	4.32	220.00	0.38
10 (V4,V2,V2)	10.85	8.25	6.79	456.86	0.79
11 (V2,V4,V2)	7.99	19.51	11.43	419.57	0.72
12 (V2,V2,V4)	8.03	4.29	15.75	331.71	0.57
13 (V4,V4,V4)	11.17	18.97	22.89	581.43	1.00

Cuadro 22. Comparación de valores estimados y observados del rendimiento de grano con respecto a la humedad - aprovechable residual promedio ponderada

Parámetros	Observados	Estimados
Constante	0.0000	-14.05
Err std de y Est	65.3161	260.09
R al cuadrado	0.8495	378.86
N°de observaciones	13	445.91
Grados de libertad	11	345.55
Coeficiente(s) x	0.9999	382.17
Err std de coef.	0.1269	338.34
	512.29	414.90
	220.00	155.62
	456.86	454.36
	419.57	428.75
	331.71	327.85
	581.43	581.74

Los parámetros estadísticos correspondientes fueron $R^2 = 0.849$, $R = 0.922$ y error estandar de 0.263. La prueba de Durbin Watson $d = 1.650$; es decir, no hay correlación del error estocástico para un nivel de -

confianza de 0.01 la regresión lineal de lo estimado y lo observado se puede verificar en el cuadro 23.

Cuadro 23. Comparación de valores estimados y observados del rendimiento relativo con respecto a la humedad aprovechable residual promedio ponderada.

Parámetros		Observados	Estimados
Constante	0.0000	0.00	-0.02
Err std de y Est	0.1124	0.27	0.45
R al cuadrado	0.8491	0.65	0.66
Nº de observaciones	13	0.83	0.77
Grados de libertad	11	0.37	0.59
Coefficiente(s) x	0.9998	0.61	0.66
Err std de coef.	0.1270	0.68	0.58
		0.88	0.71
		0.38	0.27
		0.79	0.79
		0.72	0.73
		0.57	0.56
		1.00	1.00

Déficit Evapotranspirativo. El consumo de agua para la capa 0-80 para cada fase de desarrollo se presenta en el cuadro 24, donde se aprecia la tendencia por tratamiento semejante a los apartados anteriores (mínima para el tratamiento uno, máxima para el tratamiento trece). Tomando como base estos resultados se procedió a calcular el déficit evapotranspirativo (cuadro 25) para relacionarlo con la respuesta del rendimiento del cultivo resultando lo siguiente:

La regresión polinomial del rendimiento relativo con respecto al déficit evapotranspirativo dio como resultado:

$$RR = b_0 + b_1 DV + b_2 DF + b_3 DM + b_4 DV^2 + b_5 DF^2 + b_6 DM^2 + b_7 (DV)(DF) + b_8 (DF)(DM) + b_9 (DV)(DM)$$

. . . . 10

donde:

DV = Déficit evapotranspirativo en la fase vegetativa

DF = Déficit evapotranspirativo en la fase de floración

DM = Déficit evapotranspirativo en la fase de madurez

$$b_0 = 0.987 \quad b_5 = -4.210$$

$$b_1 = -5.146 \quad b_6 = -1.644$$

$$b_2 = 1.057 \quad b_7 = 10.401$$

$$b_3 = 2.827 \quad b_8 = -0.432$$

$$b_4 = 9.233 \quad b_9 = -9.692$$

Los estadísticos de la ecuación 10 fueron $R^2 = 0.823$, $R = 0.907$ y el error estandar de 0.233; la prueba Durbin Watson $d = 2.778$ que indica que el error estocástico no tiene correlación al 0.01 del nivel de confianza. La regresión lineal de lo estimado con lo observado se visualiza en el cuadro 26.

Cuadro 24. Evapotranspiración desarrollada en diferentes fases (mm) para la capa 0-80 cm.

Tratamiento	E T A P A S			Total
	Veg.	Flor.	Mad.	
1 (V1,V1,V1)	77.64	13.34	25.77	116.75
2 (V3,V1,V1)	109.01	36.40	11.73	157.14
3 (V1,V3,V1)	77.32	32.46	27.12	136.90
4 (V3,V3,V1)	92.79	53.49	39.66	185.85
5 (V1,V1,V3)	76.20	14.30	33.37	123.87
6 (V3,V1,V3)	89.33	25.43	36.79	151.55
7 (V1,V3,V3)	77.51	40.48	33.45	151.44
8 (V3,V3,V3)	110.91	42.30	30.05	183.26
9 (V2,V2,V2)	118.74	27.41	31.16	177.31
10 (V4,V2,V2)	117.62	29.66	17.91	165.19
11 (V2,V4,V2)	93.85	74.21	32.01	200.07
12 (V2,V2,V4)	91.92	26.10	49.76	167.78
13 (V4,V4,V4)	125.21	84.04	73.74	282.99

Cuadro 25. Déficit evapotranspirativo ($1-ET/ET_{\text{máx}}$) y rendimientos resultantes.

Tratamiento	E T A P A S			RENDIMIENTOS	
	Veg.	Flor.	Mad.	kg/ha	Relativo
1 (V1,V1,V1)	0.38	0.84	0.65	0.00	0.00
2 (V3,V1,V1)	0.13	0.57	0.84	154.71	0.27
3 (V1,V3,V1)	0.38	0.61	0.63	375.29	0.65
4 (V3,V3,V1)	0.26	0.36	0.46	483.29	0.83
5 (V1,V1,V3)	0.39	0.83	0.55	217.29	0.37
6 (V3,V1,V3)	0.29	0.70	0.50	353.00	0.61
7 (V1,V3,V3)	0.38	0.52	0.55	394.71	0.68
8 (V3,V3,V3)	0.11	0.50	0.59	512.29	0.88
9 (V2,V2,V2)	0.05	0.67	0.58	220.00	0.38
10 (V4,V2,V2)	0.06	0.65	0.76	456.86	0.79
11 (V2,V4,V2)	0.25	0.12	0.57	419.57	0.72
12 (V2,V2,V4)	0.27	0.69	0.33	331.71	0.57
13 (V4,V4,V4)	0.00	0.00	0.00	581.43	1.00

Cuadro 26. Comparación de valores estimados y observados del rendimiento relativo con respecto al déficit - evapotranspirativo.

Parámetros		Observados	Estimados
Constante	-0.0003	0.00	0.03
Err std de y Est	0.1216	0.27	0.42
R al cuadrado	0.8233	0.65	0.48
Nº de observaciones	13	0.83	0.78
Grados de libertad	11	0.37	0.41
Coficiente(s) x	1.0005	0.61	0.48
Err std de coef.	0.1397	0.68	0.81
		0.88	0.90
		0.38	0.51
		0.79	0.56
		0.72	0.73
		0.57	0.61
		1.00	0.99

Otro modelo utilizado con fines de función de producción fue el propuesto por Hiler y Clark (1971). El cual considera los datos mostrados en el cuadro 25 del déficit evapotranspirativo y que se convierten en coeficientes de estrés, mientras que con los resultados de los rendimientos se obtienen los coeficientes de susceptibilidad (cuadro 27) y así poder utilizar dicho modelo. En el cuadro 28 se muestran los valores que participaron y que se sometieron a una regresión lineal resultando para rendimiento de grano:

$$RG = 534.4607 - 307.52 \text{ SDI} \quad 11$$

donde:

RG = Rendimiento de grano (kg/ha)

SDI = Índice de estrés - día

Cuadro 27. Coeficientes de estrés hídrico y de susceptibilidad

Tratamiento	Veg.	SD Flor.	Mad.	CS	SDI
1	0.38	0.84	0.65	1.00	1.87
2	0.13	0.57	0.84	0.73	1.12
3	0.38	0.61	0.63	0.35	0.57
4	0.26	0.36	0.46	0.17	0.18
5	0.39	0.83	0.55	0.63	1.11
6	0.29	0.70	0.50	0.39	0.58
7	0.38	0.52	0.55	0.32	0.46
8	0.11	0.50	0.59	0.12	0.14
9	0.05	0.67	0.58	0.62	0.81
10	0.06	0.65	0.76	0.21	0.31
11	0.25	0.12	0.57	0.28	0.26
12	0.27	0.69	0.33	0.43	0.55
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Los estadísticos resultaron $R^2 = 0.957$, $R = -0.978$, un error estándar de 34.825 y la prueba de Durbin Watson resultó $d = 2.5244$ lo cual indica que no hay correlación del error estocástico.

Con respecto al rendimiento relativo, la regresión lineal resultó:

$$RR = 0.9199 - 1.5287 SDI \dots\dots\dots 12$$

donde:

RR = Rendimiento Relativo

Los estadísticos correspondientes fueron $R^2 = 0.958$ $R = -0.979$, error estándar = 0.060 y la prueba Durbin Watson $d = 2.5444$. Es decir, no hay correlación.

Cuadro 28. Valores de los coeficientes y rendimientos para el modelo de función de producción.

Tratamiento	Rendimiento kg/ha	Rendimiento Relativo	\$DI
1	0.00	0.00	1.87
2	154.71	0.27	1.12
3	375.29	0.65	1.57
4	483.29	0.83	0.18
5	217.29	0.37	1.11
6	353.00	0.61	0.58
7	394.71	0.68	0.46
8	512.29	0.88	0.14
9	220.00	0.38	0.81
10	456.86	0.78	0.31
11	419.57	0.72	0.26
12	331.71	0.57	0.55
13	581.43	1.00	0.00

DISCUSION

Modelos para Evapotranspiración

La prueba de bondad de ajuste de los modelos utilizados con respecto a la estimación del consumo de agua mediante una regresión lineal (cuadro 18) indica que el modelo de Reddy (1983) permite simular con mayor aproximación dicho evento ya que la constante es menor y el coeficiente se acerca más a la unidad. Por otro lado, la subestimación es mucho menor que la sobre estimación en el modelo de Palacios (1981) como se puede apreciar en las figuras correspondientes.

Rendimientos

En el cuadro 19 se presentan los rendimientos donde se distingue en la repetición uno el tratamiento siete con un rendimiento mayor que los demás. Esto sucedió porque en la etapa de floración se presentaron fugas en las tuberías que regaban a dicha parcela y para repararlas fue necesario bloquear la repetición dos, por lo anterior se ve una disparidad en dichos resultados. Sin embargo, la columna de las medias se comporta como era de esperarse. Sobre todo en los tratamientos de orden creciente en los niveles de estudio como el uno, nueve, ocho y trece respectivamente.

El análisis de varianza de los rendimientos indica lo deseable en experimentación ya que entre tratamientos resulta diferencia altamente significativa al 0.01 de nivel de confianza y entre repeticiones insignificancia

El hecho de que se hayan presentado condiciones de humedad aprovechable en todos los tratamientos (con excepción del trece) permitió - garantizar el grado de sequía a que fueron sometidos. En los casos donde la capa 0-20 estuvo abajo del punto de marchitez permanente fue debido a la metodología utilizada para determinar el momento del riego que fue la propuesta por Fereres (1981) ya que considera la participación - de todas las capas del suelo para la decisión. Sin embargo, la situación mencionada en dicha capa no provocó que la planta suprimiera sus funciones fisiológicas porque si bien, el tratamiento uno no tuvo rendimiento si hubo materia vegetal ya que las hojas estuvieron presentes hasta que terminó su ciclo.

Modelos para la Estimación del Rendimiento

Los resultados obtenidos con respecto a la respuesta del cultivo y la humedad aprovechable residual promedio ponderada a partir de - las regresiones polinominales (ecuaciones 8 y 9) indican lo deseable en la experimentación ya que los estadísticos son muy altos tanto para rendimiento de grano como para el rendimiento relativo, es decir, tanto para el caso particular (ecuación 8) como para hacer inferencias generalizadas o de pronóstico para otras situaciones (ecuación 9). Por tanto, - la humedad aprovechable residual promedio ponderada es un buen índice - del grado o intensidad de la sequía y con la ecuación 9 es posible combinar su efecto con la duración o fase de desarrollo.

La regresión polinomial del déficit evapotranspirativo desde el punto de vista estadístico resultó de lo mejor que se puede esperar para fenómenos agrícolas ya que la ecuación 10, permite hacer estimaciones - con respecto a la respuesta del cultivo bajo condiciones deficitarias -

de agua y además, dichos resultados concuerdan con lo mencionado por - Doraiswamy y Thomson (1982) en el hecho de usar el déficit evapotranspi- rativo como una medida del uso estacional del agua por el cultivo y el- déficit de humedad.

Por otra parte los estadísticos obtenidos del modelo de Hiler y Clark (1971) indican que es posible simular la respuesta del rendimiento del cultivo sometido a estrés. Es decir, el índice de estrés-día permi- te evaluar la intensidad de la sequía y su efecto sobre la respuesta - del cultivo (rendimiento)

CONCLUSIONES

Los índices de la intensidad de la sequía como la humedad aprovechable residual promedio ponderada y el déficit evapotranspirativo son confiables en igual medida.

La estimación de la evapotranspiración con precisión es posible-simularla a través del modelo de Reddy (1983).

El modelo de Hiler y Clark (1971) permite hacer inferencias sobre la respuesta de un cultivo sometido a sequía.

Es posible seleccionar tratamientos en base al concepto de trabajo el cual, permite asegurar diferencias en la cuantificación del agua de riego.

El momento del riego basado en el hecho de que el potencial promedio ponderado alcance el punto de marchitez permanente, induce una sequía sistemática. Es decir, a través de todo el ciclo de cultivo.

El manejo de estas metodologías permite optimizar el uso del recurso hídrico para fines agrícolas.

RESUMEN

Se evaluaron la combinación de dos metodologías para definir la cuantificación y el momento del riego, dos modelos para estimar la evapotranspiración real del cultivo y tres modelos para inferir sobre la respuesta del rendimiento del cultivo sometido a sequía.

Se probaron cuatro niveles de volúmenes de agua aplicados con un sistema de microaspersión, combinados con tres fases de desarrollo. Los niveles se seleccionaron en base al concepto de trabajo o energía a partir de la curva de retención de humedad del suelo y el riego se aplicó hasta que se abatió la humedad al potencial promedio ponderado equivalente al punto de marchitez permanente.

Los resultados de este trabajo indican que es posible estimar la evapotranspiración con precisión y que los índices de sequía analizados son confiables en igual medida con la finalidad de inferir en el rendimiento. Por lo anterior, se concluye que el manejo de estas herramientas permiten optimizar el uso del recurso hídrico para fines agrícolas.

LITERATURA CITADA

- Clothier, B. and T. Heiler. 1983. Infiltration during sprinkler irrigation: Theory and fields results. Proceeding of the national conference on advances in infiltration. ASAE. Chicago. 111. 275-283 p.
- Dixon, R.M. 1972. Controlling infiltration in bi-modal porous soils: Air earth interface concept. Proc. 2nd. Symp. Fundamentals of transport in porous media. IAHR-ISSS: 102-117 p.
- Doorenbos, J. y A.H. Kassam. 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 190-212 p.
- Doraiswamy, P.C. and D.R. Thomson. 1982. A crop moisture stress index for large areas and its application in the prediction of spring wheat phenology. Meteorol. 27:1-15 p.
- Escobar, M.A. y C.E. Ramírez. 1979. Informe de investigación. Inédito. Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego. SARH. México 25 p.
- Faires, V. 1975. Termodinámica. 2a. ed. UTEHA. México. 29-40 p.
- Fereres, E. 1981. Papel de la fisiología vegetal en la microirrigación. Recomendaciones para el manejo mejorado. IV Seminario Latinoamericano "Riego por Goteo Localizado". IICA, Venezuela. 20-30 p.
- Fereres, E., E. Acevedo, D.W. Henderson and T.C. Hsiao. 1978. Seasonal changes in water potential and turgor maintenance in sorghum and maize under water stress. Plant Physiology 44:261-267 p.
- Hanks, R.J. 1974. Model for predicting plant-yield as influenced by water use. Agron. J., 65:660-665 p.
- Hanson, A.E. and W.D. Hitz. 1982. Metabolic responses of mesophytes to plant water deficits. Ann. Rev. Plant Physiol. 33:163-203 p.
- Hiler, E.A. and R.N. Clark. 1971. Stress day index to characterize effects of water stress on crop yields. Transaction of the ASAE Michigan, U.S.A. 14(4):757-761 p.

- Hsiao, T.C.; E. Acevedo and D.W. Henderson. 1970. Maize leaf elongation: continuous measurements and close dependence on plant water stress. *Science*. 509-591 p.
- Jensen, M.E. 1968. Water consumption by agricultural plants. In T.T. K^olowski (ed). *Water deficit and plant growth*. Academic Press New York and London U.S.A. 2:1-22 p.
- Kanemasu, E.T. 1977. Estimated winter wheat yield from crop growth predicted by Lansat: Final report. Contract NAS 9-14899, March 1976- March 1977. Kansas State University, Manhattan, KS. 173 p
- León, I.C. de. 1981. Evaluación de modelos de producción para el cultivo de maíz, en función del régimen hídrico en diferentes etapas fenológicas. Tesis. Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Coahuila, México. 20-40 p.
- Levitt, J. 1972. Responses of plant to environmental stresses. Academic Press New York and London U.S.A. 568 p.
- Palacios, V.E. 1981. Estimación de los requerimientos de agua de los cultivos para conocer el cuando y el cuanto regar. Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados (Recopilación de Artículos Publicados) Chapingo, México. 5-20 p.
- Rasmussen, V.P. and R. J. Hanks. 1978. Spring wheat fields model for limited moisture conditions. *Agron. J.* 70: 940-944 p.
- Reddy, S.J. 1983. A simple method of estimating the soil water balance. *Agriculture Meteorology* 28:1-17 p.
- Rojas, B.A. 1979. Análisis estadístico del diseño San Cristóbal con tres factores. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Tema didáctico Vol. 7. México, 17 p.
- Tanner C.B. and W.A. Jury. 1976. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. *Agron. J.* 68: 239-243 p.
- Taylor, A.H. 1952. Evaporation and moisture and heat fields in the soil. *J. Meteorol.* 14:354-366 p.

APENDICE A
EVOLUCION DE LA HUMEDAD Y EVAPORACION

Cuadro 1A. Evolución de la humedad observada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del tratamiento dos			
	0-20	20-40	40-60	60-80
1	52.01	55.44	57.22	57.96
9	37.10	47.99	48.51	50.51
15	45.07	49.34	51.80	51.72
20	35.69	44.29	47.68	48.64
24	47.59	50.41	64.27	65.82
43	44.74	46.61	49.31	52.37
49	40.61	47.02	44.92	46.68
50	42.53	46.51	49.90	55.18
58	42.41	45.76	47.12	50.38
62	40.03	43.83	45.38	47.84
65	44.62	44.58	50.14	56.68
69	37.49	44.48	51.46	54.86
76	36.62	41.82	46.58	51.64
79	44.64	45.62	50.39	56.36
92	38.98	43.03	44.90	58.37

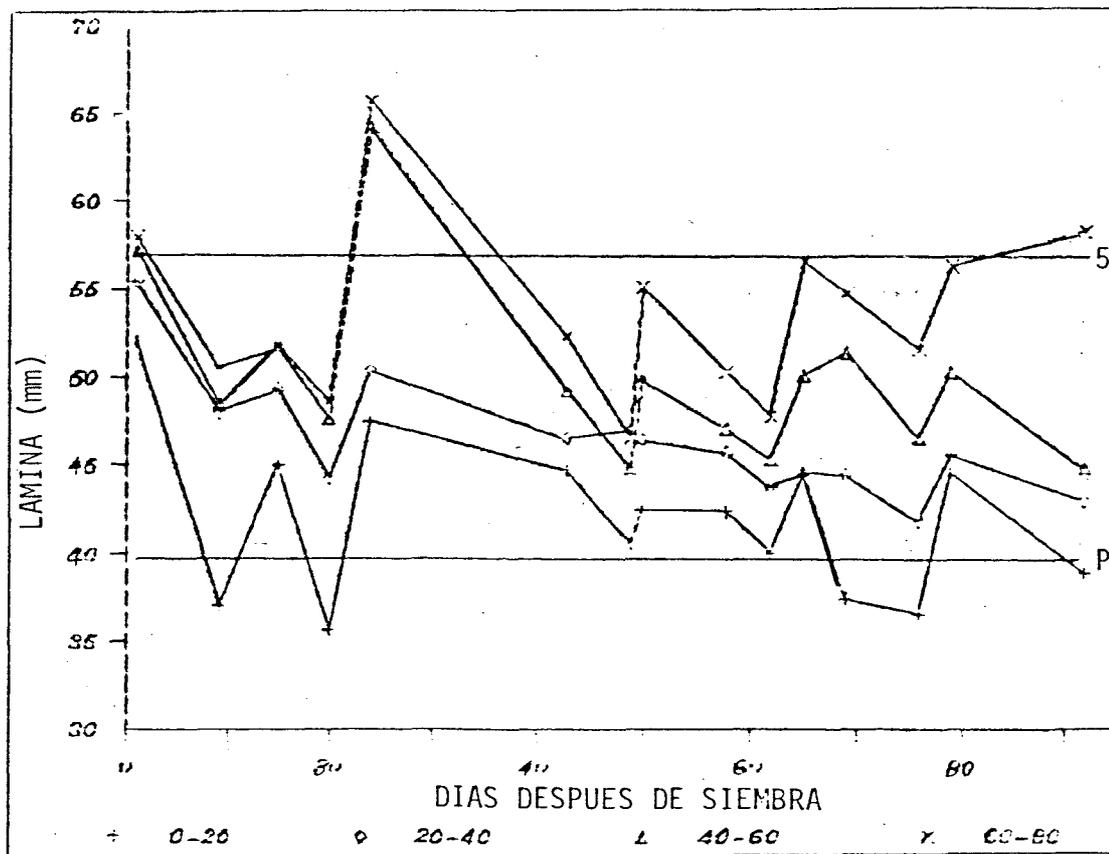


Figura 1A. Evolución de la humedad del tratamiento dos.

Cuadro 2A. Evolución de la humedad observada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del tratamiento tres			
	0-20	20-40	40-60	60-80
1	52.01	55.44	57.22	57.96
9	37.10	47.99	48.51	50.51
15	45.07	49.34	51.80	51.72
20	35.69	44.29	47.68	48.64
24	38.81	44.36	47.34	50.94
29	40.56	43.10	44.29	46.90
36	40.37	44.09	44.04	36.78
49	41.38	46.15	48.24	48.93
51	66.17	50.22	51.70	50.12
76	39.94	47.63	47.43	50.75
79	45.52	45.98	51.44	54.30
92	32.62	45.30	47.12	45.38

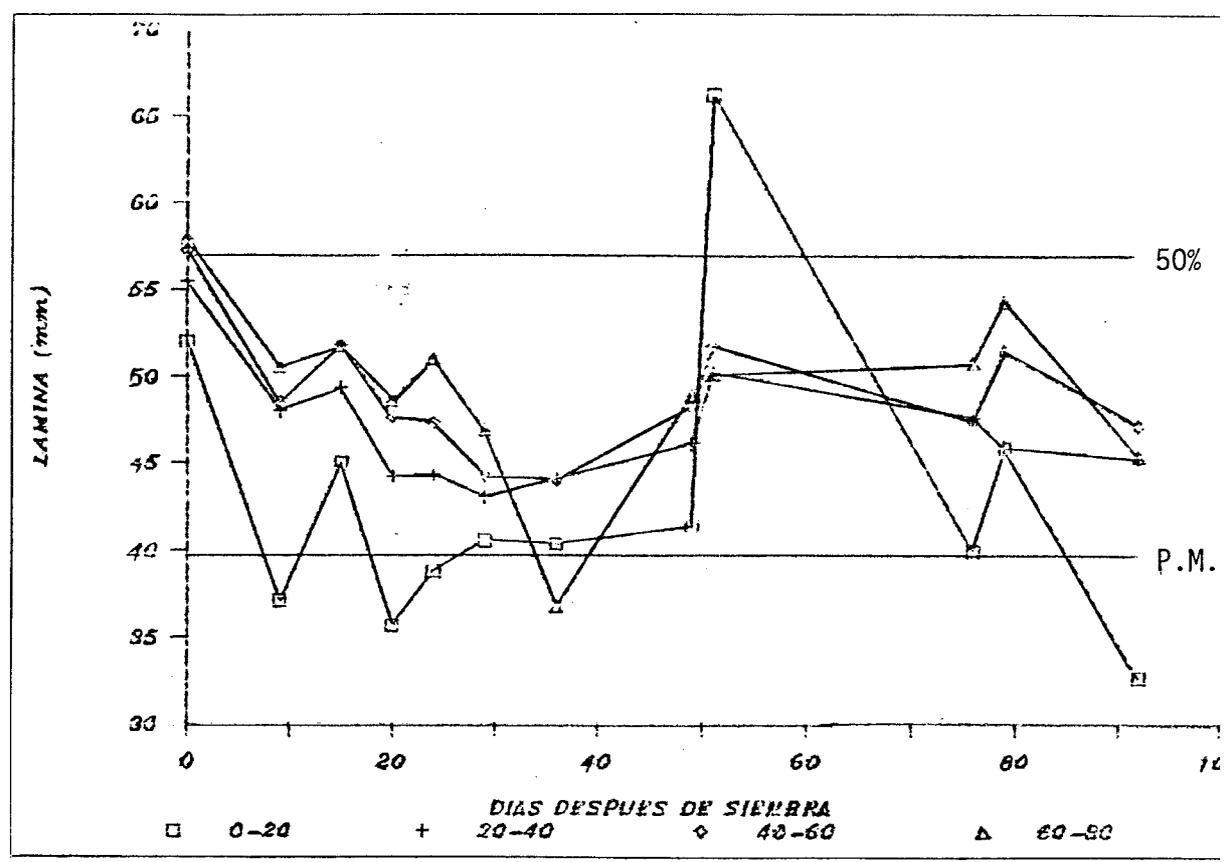


Figura 2A. Evolución de la humedad del tratamiento tres

Cuadro 3A. Evolución de la humedad observada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del tratamiento cuatro			
	0-20	20-40	40-60	60-80
1	52.01	55.44	57.22	57.96
9	37.10	47.99	48.51	50.51
15	45.07	49.34	51.80	51.72
20	35.69	44.29	47.68	48.64
24	37.59	50.41	64.27	65.82
43	42.36	43.58	45.68	51.26
49	41.98	43.61	47.46	52.49
51	67.10	54.11	52.22	55.08
76	37.73	40.63	45.55	51.11
79	57.91	48.50	50.07	52.18
92	34.01	42.83	45.19	46.97

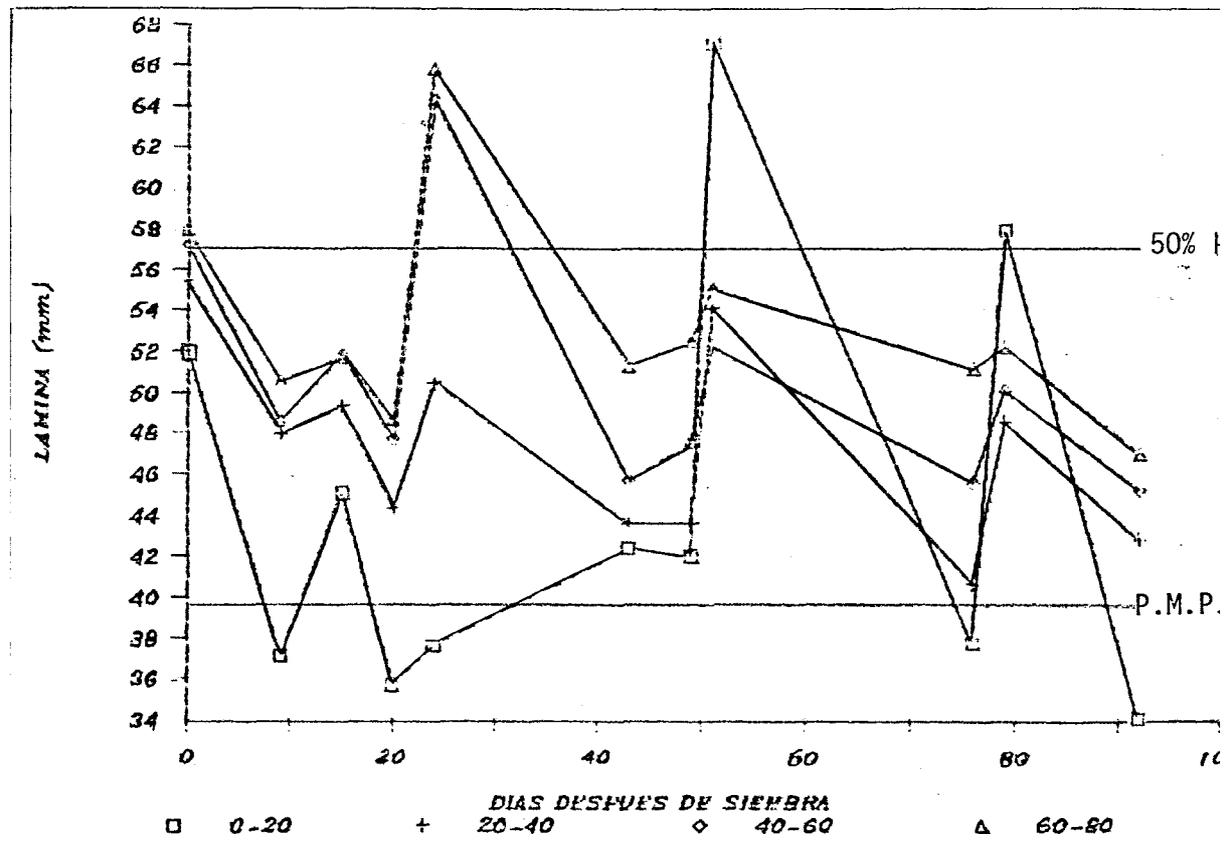


Figura 3A. Evolución de la humedad del tratamiento cuatro.

Cuadro 4A. Evolución de la humedad observada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del tratamiento cinco			
	0-20	20-40	40-60	60-80
1	52.01	55.44	57.22	57.96
9	37.10	47.99	48.51	50.51
15	45.07	49.34	51.80	51.72
20	35.69	44.29	47.68	48.64
24	38.81	44.36	47.34	50.94
29	36.79	44.24	47.82	54.62
36	43.18	46.92	52.92	56.36
49	40.61	43.29	47.65	49.76
50	44.34	47.46	49.85	51.62
57	40.87	45.30	54.97	56.68
62	40.46	47.24	49.65	53.87
65	44.33	49.37	52.07	54.96
69	40.43	44.19	49.34	54.52
76	40.44	44.43	49.31	54.18
80	57.50	48.62	55.19	54.64
92	40.34	44.38	43.31	54.55

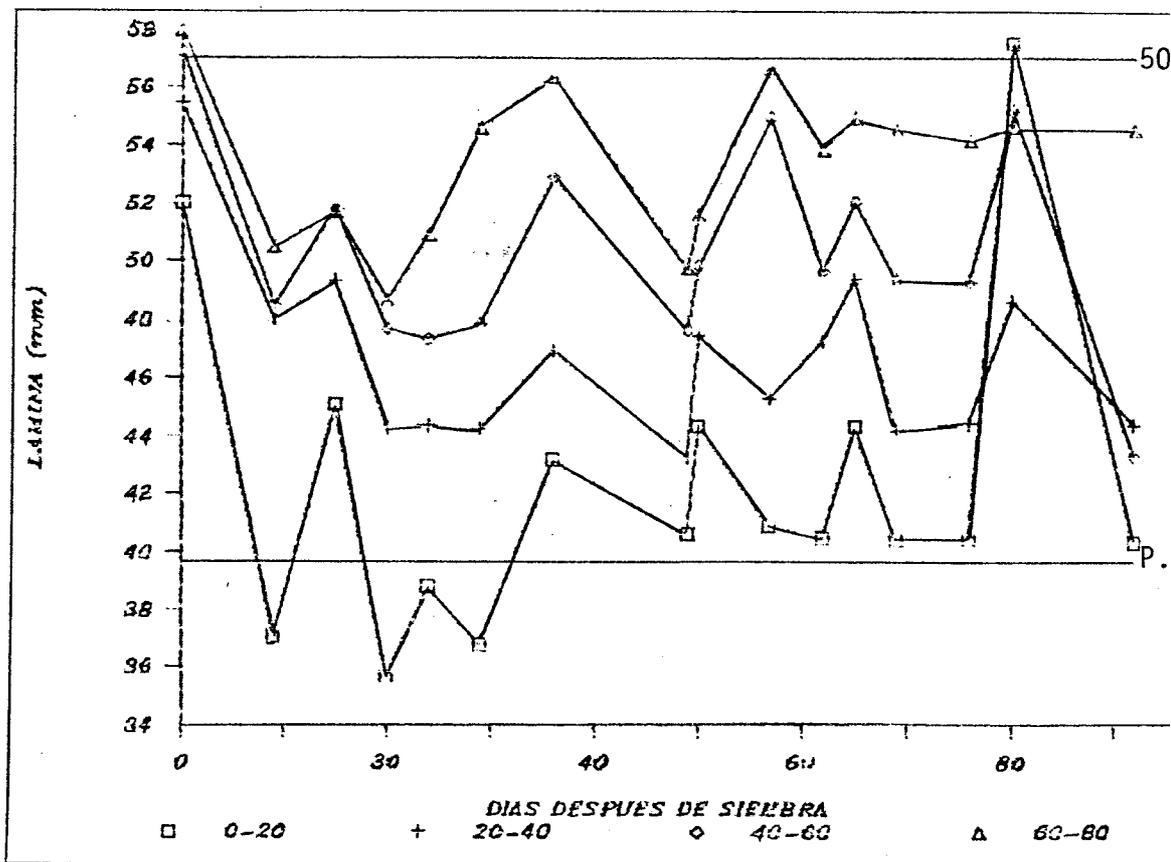


Figura 4A. Evolución de la humedad del tratamiento cinco.

Cuadro 5A. Evolución de la humedad observada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas 0-20	Láminas 20-40	Láminas 40-60	Láminas 60-80
1	52.01	55.44	57.22	57.96
9	37.10	47.99	48.51	50.51
15	45.07	49.34	51.80	51.72
20	35.69	44.29	47.68	48.64
24	47.59	50.41	64.27	65.82
43	43.17	46.52	52.05	55.01
49	41.98	46.51	52.44	57.98
50	44.16	48.21	51.75	56.63
57	42.67	48.21	54.41	57.79
62	39.89	46.78	48.29	56.19
65	42.89	46.44	51.85	58.24
69	40.20	45.50	50.80	51.74
76	38.21	44.50	51.29	49.59
80	63.48	53.00	50.65	57.31
92	37.66	46.92	50.34	52.73

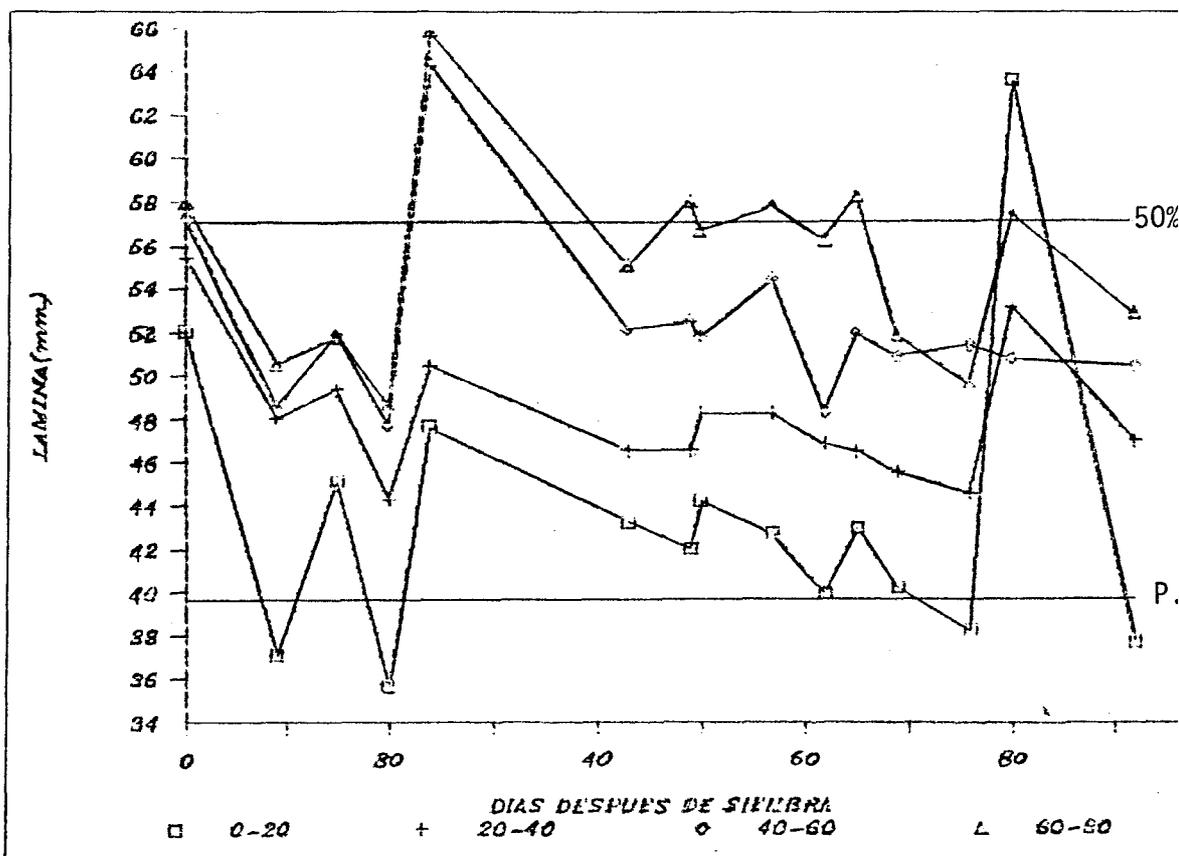


Figura 5A. Evolución de la humedad del tratamiento seis.

Cuadro 6A. Evolución de la humedad observada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del tratamiento siete			
	0-20	20-40	40-60	60-80
1	52.01	55.44	57.22	57.96
9	37.10	47.99	48.51	50.51
15	45.07	49.34	51.80	51.72
20	35.06	44.29	47.68	48.64
24	38.81	44.36	47.34	50.94
29	41.30	46.37	53.24	56.31
36	38.83	43.03	46.99	44.70
49	38.90	41.65	44.36	39.18
51	60.41	47.36	49.04	49.22
76	34.10	41.12	43.53	46.80
80	60.94	50.34	46.56	43.85
92	40.10	46.20	40.58	41.36

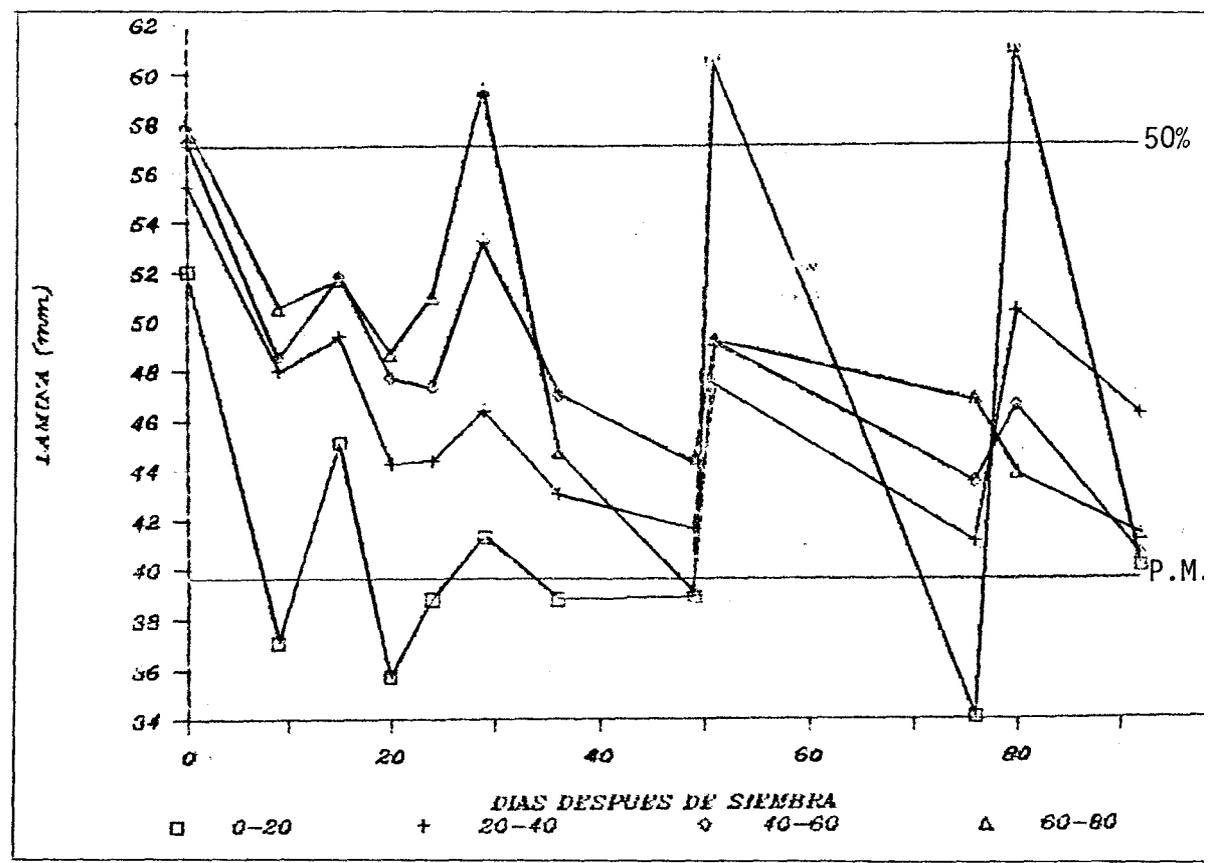


Figura 6A. Evolución de la humedad del tratamiento siete.

Cuadro 7A. Evolución de la humedad observada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del tratamiento diez			
	0-20	20-40	40-60	60-80
1	52.01	55.44	57.22	57.96
9	37.10	47.99	48.51	50.51
15	45.07	49.34	51.80	51.72
20	35.69	44.29	47.68	48.64
24	63.19	65.73	66.98	61.95
43	40.39	40.87	52.66	54.86
49	46.97	48.13	51.14	54.14
51	51.41	50.09	53.97	56.24
62	41.78	45.45	50.31	51.24
69	40.80	44.04	50.09	51.96
76	39.14	42.42	48.31	52.18
79	49.44	48.40	49.80	53.17
92	46.70	43.25	47.07	45.88

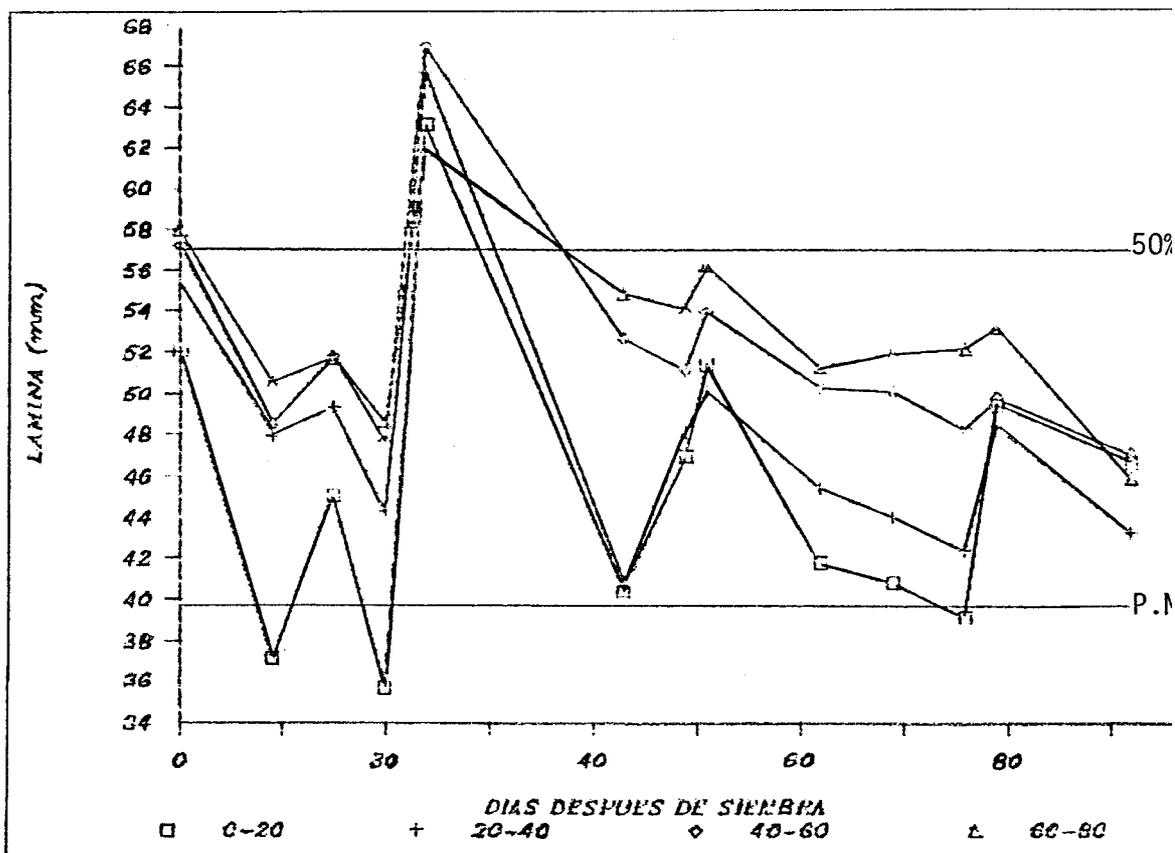


Figura 7A. Evolución de la humedad del tratamiento diez.

Cuadro 8A. Evolución de la humedad observada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del tratamiento once			
	0-20	20-40	40-60	60-80
1	52.01	55.44	57.22	57.96
9	37.10	47.99	48.51	50.51
15	45.07	49.34	51.80	51.72
20	35.69	44.29	47.68	48.64
24	41.88	49.32	56.07	57.23
49	39.74	42.52	43.82	44.72
51	73.58	63.45	69.56	65.24
55	57.41	63.43	58.44	60.43
76	42.00	49.92	52.97	52.73
79	58.18	52.56	53.56	57.14
92	41.30	51.01	48.04	49.08

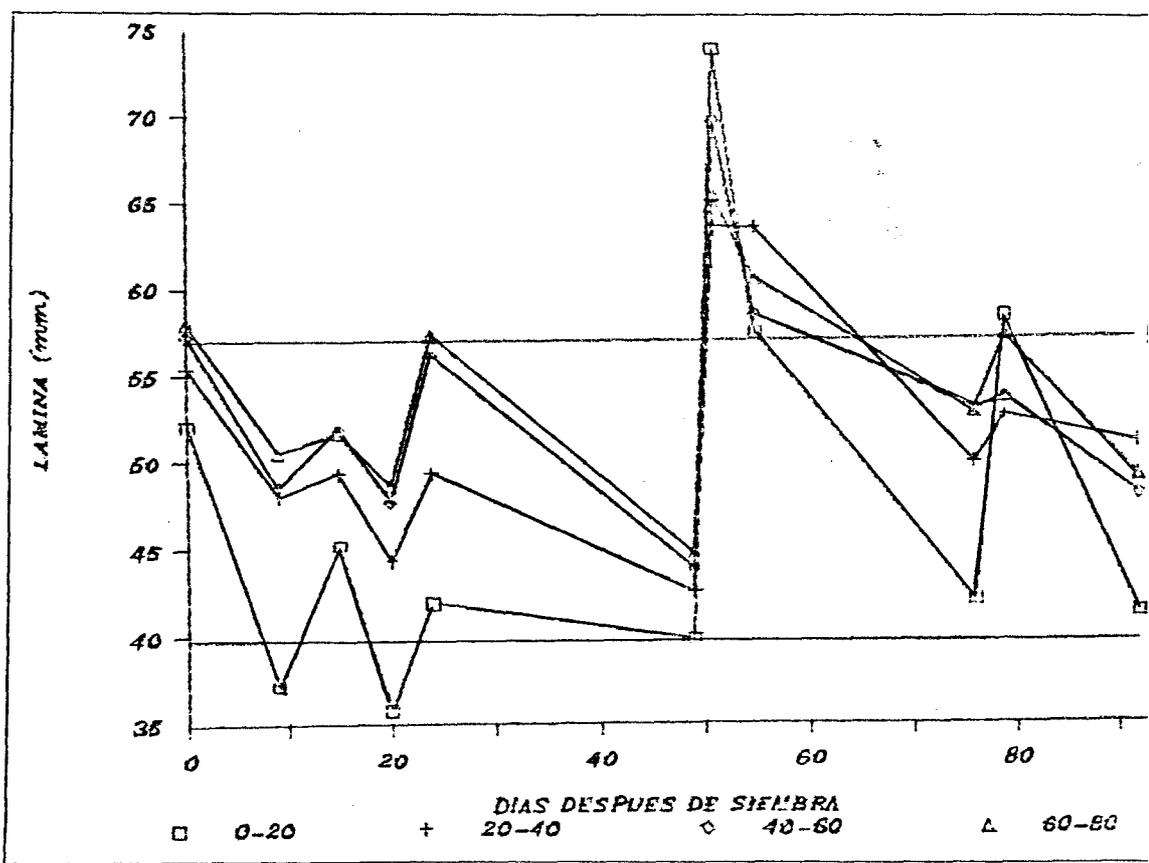


Figura 8A. Evolución de la humedad del tratamiento once.

Cuadro 9A. Evolución de la humedad observada (mm)

Días desp. Siembra	Láminas del tratamiento doce			
	0-20	20-40	40-60	60-80
1	52.01	55.44	57.22	57.96
9	37.10	47.99	48.51	50.51
15	45.07	49.34	51.80	51.72
20	35.69	44.29	47.68	48.64
24	41.88	49.32	56.07	57.23
49	37.54	42.96	44.63	47.60
51	45.36	46.20	50.85	48.86
52	37.54	42.16	44.82	49.42
69	36.00	41.29	42.65	45.04
76	37.20	40.27	43.82	43.78
80	66.67	72.24	69.76	62.90
92	49.54	58.06	56.71	57.50

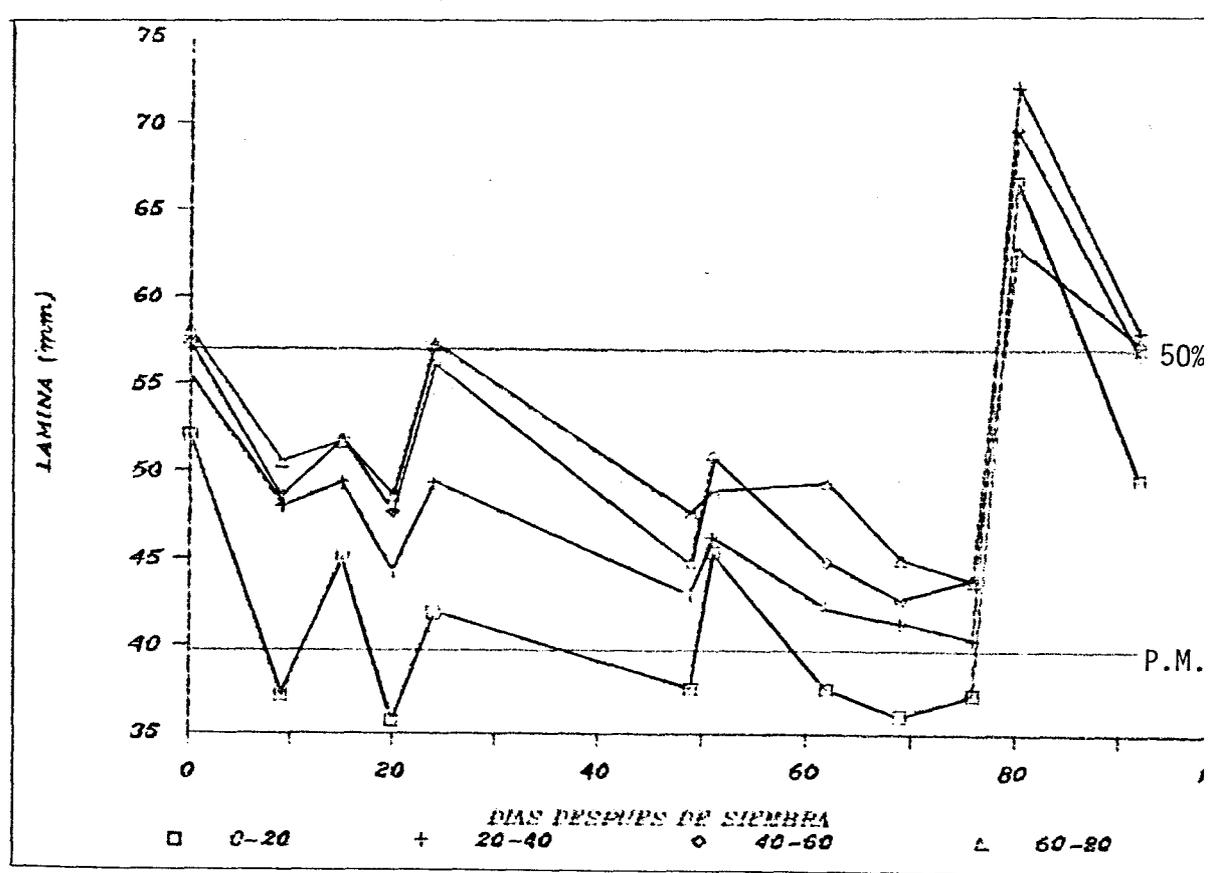


Figura 9A. Evolución de la humedad del tratamiento doce.

Cuadro 10A. Evaporación (mm) de tanque tipo "A" registrada en la estación climatológica del CENID-RASPA - en el ciclo de cultivo.

Día	Agosto	M Septiembre	E Octubre	S Noviembre
1	-	7.71	6.73	4.18
2	-	5.51	4.51	5.97
3	-	7.26	5.49	3.66
4	-	4.28	5.49	3.00
5	-	4.37	5.11	4.80
6	-	4.86	6.26	5.14
7	-	9.23	7.27	3.64
8	-	6.80	5.80	4.44
9	-	8.45	3.77	5.27
10	6.45	5.53	6.50	4.13
11	8.92	9.21	4.69	5.08
12	8.00	4.38	3.71	-
13	8.63	7.07	5.37	-
14	9.58	7.95	4.96	-
15	7.34	5.70	9.97	-
16	8.25	5.57	6.20	-
17	7.19	2.40	5.76	-
18	6.93	3.95	4.21	-
19	5.87	9.02	5.05	-
20	4.80	8.83	5.32	-
21	5.60	8.01	6.62	-
22	4.80	7.32	5.66	-
23	6.10	5.60	3.81	-
24	6.14	6.00	6.48	-
25	7.56	4.76	4.58	-
26	6.80	6.79	5.69	-
27	7.88	5.65	3.73	-
28	7.50	6.12	4.28	-
29	7.25	6.08	4.57	-
30	7.05	6.91	3.75	-
31	6.79	-	4.35	-