

0-833
Duplicado

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
SECCION DE HIDRAULICA

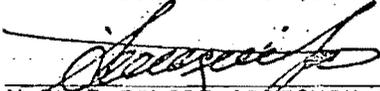
"SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DE CULTIVOS Y SU APLICACION
PARA LA DETERMINACION DE LAS POLITICAS DE RIEGO"

Tesis que presenta

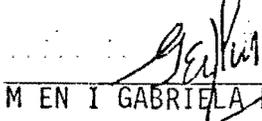
NABIL JOSEPH EID

Para obtener el grado de
DOCTOR EN INGENIERIA HIDRAULICA

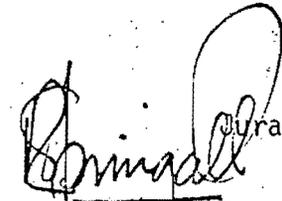
Coordinador de la Sección

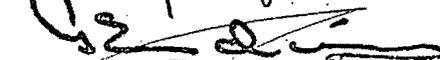

M EN I FELIPE ABREGUIN CORTES

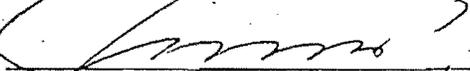
Secretario Académico


M EN I GABRIELA MOELLER CHAVEZ

Jurado:

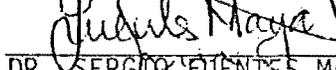

DR. ROLANDO SPRINGALL GALINDO

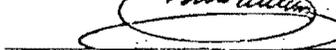

DR. GABRIEL ECHAVEZ ALDAPE


DR. FERNANDO GONZALEZ VILLARREAL


M EN I ANTONIO CAPELLA VIZCAINO


M EN C. MARIA DEL CARMEN SANCHEZ MORA


DR. SERGIO FUENTES MAYA


DR. RAUL CUELLAR CHAVEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



DEPARTAMENTO DE...

T. UNAM

1984

(ID)

Ej. 2

i

I N D I C E

1.	INTRODUCCION Y OBJETIVOS	1
2.	PROCEDIMIENTOS METODOLOGICOS	7
2.1	<u>Construcción del Modelo</u>	8
2.1.1	Clasificación de las Variables	8
2.1.2	Definición de las Fronteras del Sistema	9
2.1.3	Frecuencia y Perfil de Simulación	10
2.1.4	Composición de la Salida del Sistema	10
2.1.5	Dinámica del Sistema	11
2.2	<u>Calibración del Modelo</u>	14
2.3	<u>Verificación del Modelo</u>	15
2.4	Evaluación Económica	15
3.	EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS BAJO LA INFLUENCIA DEL AGUA, FERTILIDAD Y SALINIDAD DEL SUELO	17
3.1	<u>La Transpiración y el Rendimiento Relativo</u>	17
3.2	<u>Otención del Rendimiento Máximo</u>	23
3.3	<u>Efecto de la Salinidad en el Rendimiento de los Cul- tivos</u>	26
3.3.1	Teorías y Clasificación del Efecto de las Sales en los Cultivos	27
3.3.2	Factores que Influyen en la Tolerancia de los Culti- vos a las Sales	30
3.3.3	Relaciones Generalizadas Entre el Rendimiento del Cultivo y el Efecto de la Concentración de las Sales del Suelo	33

3.3.4	Discusión del Modelo Propuesto por Maas y Hoffman	36
3.3.5	Propuesta de Inclusión del Efecto de la Salinidad del Suelo Sobre la Transpiración del Cultivo	38
3.4.	<u>Efecto de la Fertilización en el Nivel de Salinización de los Suelos</u>	40
3.5	<u>Eficiencia de la Fertilización con Nitrógeno, Bajo Diferentes Niveles de Humedad del Suelo</u>	45
4.	BALANCE Y REDISTRIBUCION DEL AGUA Y DE LAS SALES EN EL SUELO	53
4.1	<u>Introducción</u>	53
4.2	<u>Modelo Empírico</u>	58
4.2.1	Balance del Agua	58
4.2.2	Balance de Sales en el Suelo	62
4.2.3	Infiltración	66
4.2.4	Redistribución del Agua y de las Sales	68
5.	DESCRIPCION DE LOS EXPERIMENTOS, CALIBRACION Y VERIFICACION DEL MODELO	78
5.1	<u>Experimento Realizado en el CENAMAR</u>	78
5.2	<u>Experimento del Distrito de Riego de TULA</u>	84
5.3	<u>Calibración del Modelo</u>	86
5.3.1	Datos Complementarios	86
5.3.2	Resultados y Discusión	92
5.4	<u>Verificación del Modelo</u>	104
6.	EVALUACION ECONOMICA	108

7. CONCLUSIONES 125

BIBLIOGRAFIA

ANEXO I DESCRIPCION DE LOS DATOS DE ENTRADA AL MODELO I.1

ANEXO II DESCRIPCION DEL PROGRAMA DE SIMULACION II.1

ANEXO III PROGRAMA EN FORTRAN III.1

R E S U M E N

Se construye un modelo matemático de simulación del crecimiento diario de los cultivos que evalúa su rendimiento, relativo a un máximo, en función de las láminas transpiradas, relativas también a un máximo obtenido en función del poder evaporante de la atmósfera y del estado de desarrollo del cultivo.

Se determina la transpiración del cultivo en función del contenido de humedad aprovechable residual en las capas de suelo que contienen raíces. Se ajusta el valor de este contenido de humedad en función de la concentración de sales del extracto de saturación del suelo. La fertilización se considera a nivel del ciclo total del cultivo para la determinación del rendimiento máximo.

Se calculan los contenidos de humedad aprovechable y las concentraciones salinas diarias del suelo a través de un balance empírico en el perfil de simulación, que además considera la redistribución entre capas de estas variables, en función de las tensiones de succión total originadas en el medio.

Se calibra el modelo para dos localidades y la regresión entre el rendimiento observado y el simulado indica un coeficiente de determinación no inferior al 85 por ciento.

Por último, se realiza simulación plurianual con climatología determinística, a fin de determinar las políticas de riego que proporcionan un mayor beneficio para diferentes precios del agua de riego.

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

Sin restar importancia a la investigación de campo, sino por el contrario, apoyarla para que cada vez sea más confiable, precisa, y su divulgación sea mayor, se puede afirmar que el uso de modelos matemáticos de simulación adecuados, puede permitir llegar a conclusiones sobre diferentes alternativas de políticas de riego a seguir, sin involucrar costos y el tiempo requerido para realizar las investigaciones de campo. Sin embargo, por más confiable que pueda ser un modelo matemático de simulación, son estas investigaciones de campo, o la propia práctica, los que pueden confirmar la adecuación de la política de riego a implementar.

En el ámbito de la ingeniería de los recursos agua y suelo, el objetivo es el empleo racional de éstos con vistas a obtener mayores beneficios en términos de la producción y comercialización de la cosecha, por cada unidad de insumo empleada (agua, fertilizantes, plaguicidas, etc.), por cada unidad de tiempo y de área cultivada. Además de los costos de los insumos, están involucrados la operación y el mantenimiento, entre otros.

Si se considera que el sistema tiene una eficiencia de aplicación establecida, además de contar con los gastos necesarios en el momento oportuno, queda la posibilidad de obtener mayores beneficios a través del mejoramiento de las relaciones en el sistema agua-suelo-planta-atmósfera. La precipitación pluvial y la evaporación son variables externas, no controlables, que actúan sobre el subsistema constituido por el suelo y la planta: el agua de riego se constituye en variable externa controlable cuando la lámina y el momento de riego son conocidos a priori, y el suelo es un recurso que debe ser preservado, aunque no se considere las posibilidades de erosión hídrica debido a las condiciones observadas en las zonas de riego. Así mismo, la necesidad y el uso cada vez más frecuente de aguas con altos contenidos de sales disueltas, en los riegos, requiere consideraciones acerca de la conservación del suelo, cuyo planteamiento se puede realizar a través de la introducción del concepto de su valor de recuperación, que es variable en función de la concentración salina de su extracto de saturación.

El desarrollo y la productividad de los cultivos también son función de los siguientes factores:

- niveles de humedad del suelo
- cantidades de agua transpiradas (a su vez función del poder

- evaporante de la atmósfera)
- uso adecuado de fertilizantes
- fecha de siembra, de las prácticas de cultivo (cuando el hombre actúa sobre el sistema)
- condición de drenaje del suelo
- ocurrencia o no de plagas y su control
- calidad de las semillas
- variedad de la especie cultivada
- adaptación al ecosistema
- factores dependientes de la fisiología vegetal

La productividad de los cultivos se ha establecido, a lo largo del tiempo, a través de su relación con uno o más de estos factores, inicialmente de forma empírica, contando actualmente con avances sustanciales a nivel del conocimiento analítico que permiten incrementar la confiabilidad de estas relaciones.

A la fecha, se han desarrollado numerosos modelos matemáticos de simulación de la productividad de los cultivos, absoluta o relativa a un nivel máximo, con la cantidad de agua transpirada (Doorenbos y Kassam (1979), Hanks (1974)), evapotranspirada (Dutt y otros (1972)), aplicada en riegos (Hanks y Hill (1980)), cantidad de fertilizantes aplicados (Mombiela y Nelson (1981)), nivel de sales disueltas en el suelo (Childs y Hanks (1975), Childs y otros (1977)), profundidad del nivel freático (Williamson y Kriz (1970)), entre otros.

El principal objetivo de este trabajo es la construcción de un modelo matemático de simulación del crecimiento de cultivos que permita la determinación

de sus rendimientos en función de la cantidad diaria de humedad almacenada, y concentración salina del extracto de saturación del suelo, así como de la cantidad estacional de fertilizantes aplicada al suelo.

Sin embargo, lo anterior no es el objetivo último de este trabajo. Son amplias las aplicaciones potenciales del modelo, dentro las cuales se puede mencionar la predicción de los beneficios netos que pueden obtenerse a diferentes políticas de riego, representativas del porcentaje de humedad aprovechable mínima en el suelo, para diferentes precios de los insumos; la evaluación económica de políticas de riego que permitan incrementar el doble cultivo, con una cantidad fija de agua para el primer y segundo cultivos; para esta última condición evaluar la eficiencia de políticas de lavado de las sales del perfil de suelo cultivable, entre otras.

La principal contribución de este trabajo es el desarrollo de la primera aplicación de las mencionadas potencialidades del modelo, con la determinación de la política de riego que proporciona el mayor valor de beneficios netos para diferentes precios unitarios del agua de riego.

Como contribuciones específicas se puede mencionar:

- a) la consideración conjunta de los efectos del agua, fertilizantes y sales (provenientes del agua de riego y/o del manto freático), para la evaluación del rendimiento de los cultivos
- b) la interacción entre los factores agua, fertilizantes y sales.
- c) la calibración del modelo para el cultivo de dos variedades de maíz (H-412 en el Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego y H-133 en el Distrito de Riego de Tula), para posteriormente

A continuación se describe el contenido de los capítulos de este trabajo.

En el capítulo 2 se describen los procedimientos metodológicos que se emplean para la construcción, calibración y verificación del modelo. Las variables se clasifican, se definen las fronteras del sistema y su dinámica, para finalizar con el planteamiento empleado para la evaluación económica.

En el capítulo 3 se analizan los efectos individuales de cada parámetro, así como la interacción de efectos del contenido de humedad aprovechable, concentración salina del extracto de saturación y fertilidad del suelo, sobre el rendimiento del cultivo, este último calculado en función de su transpiración.

En el capítulo 4 se describen los métodos empíricos empleados para los balances de agua y sales en el suelo, así como su redistribución en función de las tensiones existentes en el medio.

En el capítulo 5 se realiza la descripción de los experimentos, así como la calibración y verificación del comportamiento del modelo, para las dos localidades en estudio.

En el capítulo 6 se realiza la evaluación económica de las políticas de riego para los diferentes precios unitarios del agua de riego. Se consideran en esta evaluación únicamente los precios de los insumos y el precio de comercialización de la cosecha, y se consideran fijos los costos de operación y mantenimiento.

Finalmente, en el capítulo 7 se presentan las conclusiones del trabajo y los anexos describen el modelo de simulación, en función de la lógica de progra-

mación, los datos de entrada al modelo y se presenta el programa en lenguaje FORTRAN.

2. PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS .

En este capítulo se describe la metodología empleada para la definición/construcción, calibración y verificación del modelo a nivel de un ciclo de cultivo. Asimismo, se describe la metodología con la cual se realiza la predicción del rendimiento a largo plazo y la correspondiente evaluación económica para diferentes valores de las variables exógenas al sistema, que definen el medio ambiente.

La clasificación de las variables que intervienen en el modelo está incluida en la descripción de su construcción.

2.1 Construcción del Modelo

2.1.1 Clasificación de las Variables

Se clasifican como variables exógenas controlables la lámina de riego aplicada a nivel parcelario, función de la política de riego; la cantidad de fertilizante aplicada al suelo y la concentración salina del agua de riego o del manto freático. Los precios del agua de riego, cosecha y fertilizantes son variables de esta naturaleza que intervienen cuando ya se plantea la evaluación económica.

Las concentraciones salinas del agua de riego se clasifican como variables controlables debido a la posibilidad de mezclar las aguas provenientes de diferentes fuentes, además se consideran constantes y conocidas a futuro. Su cambio de categoría a variable exógena no controlable es bastante complejo y no se contempla en este trabajo.

Como variables exógenas no controlables se consideran a la precipitación, temperatura del aire, evaporación de tanque clase A y la profundidad del manto freático con respecto a la superficie.

Las variables que representan internamente al sistema son las que caracterizan físico-químicamente al suelo, tanto valores iniciales, como valores periódicos que se van asignando de acuerdo a la dinámica del sistema, a lo largo de la simulación. Las principales variables clasificadas con esta denominación son los contenidos de humedad aprovechable residual y la concentración de sales en el perfil del suelo, ambas dependientes de las variables exógenas al sistema.

Otras variables clasificadas bajo la categoría anterior se refieren a la fi-

siología vegetal, en particular a la profundidad radicular alcanzada por el cultivo durante su desarrollo. No obstante considerar estas variables bajo esta última clasificación, difieren de las anteriores, ya que desde el momento en que se tiene determinada la especie a ser cultivada, la función de desarrollo radicular se considera de variación conocida y prefijada, con valores determinados independientemente de las variables exógenas al sistema.

Por último, la variable que define la salida del sistema es la transpiración del cultivo, producto de la dinámica de interrelación entre las demás variables del sistema, a excepción de la cantidad de fertilizantes aplicada al suelo.

2.1.2 Definición de las Fronteras del Sistema.

La frontera lateral permite definir el área que será representada, su extensión está sujeta a la condición de uniformidad de las variables que representan internamente al sistema. Asimismo, cuando las variables exógenas son diferentes en una formación dada de suelos con uniformidad semejante, se debe considerar la aplicación de diferentes tratamientos. Sin embargo, los experimentos frecuentemente se realizan en una única formación de suelos, aunque exista más de una en determinada área de interés.

La frontera superior del sistema está definida por el cultivo y la superficie del terreno. La posición de la frontera inferior es dependiente de la profundidad a que se encuentra el manto freático. Si se encuentra a una profundidad tal que permita la ocurrencia de contribución de humedad a la zona radicular del cultivo, por ascensión capilar, entonces ésta será la profundidad a que se encuentra la frontera inferior. De no ser así, la frontera inferior corresponderá al plano ubicado a una profundidad igual a la máxima de

la zona radicular.

En este sistema las entradas y las salidas se realizan únicamente en la dirección vertical.

2.1.3 Frecuencia y Perfil de Simulación.

Se ha considerado adecuada la frecuencia diaria de simulación, principalmente por ser ésta a la que se realiza un gran número de mediciones de las variables empleadas en este modelo además, el incrementar la frecuencia representaría un aumento de los costos de computación.

El perfil del suelo se subdivide en capas, de espesor constante o variable, de acuerdo a los datos disponibles para su caracterización. Esta subdivisión permite obtener una mejor representación de los flujos ascendentes y descendentes del agua y de las sales. Lo anterior está sujeto a la relación existente entre la precisión y el costo asociado para obtener una representación mejor. Por lo general el perfil del suelo se subdivide en capas de 30 cm de espesor, cuando se dispone de suelos profundos, con suelos de escasa profundidad es recomendable reducir este espesor.

2.1.4 Composición de la Salida del Sistema

El rendimiento simulado, respuesta del modelo, se determina para el ciclo total del cultivo. En tanto, su composición, relativa a un valor máximo obtenible bajo condiciones óptimas de las variables exógenas controlables, para la producción del cultivo, se determina a nivel diario.

Se emplea el planteamiento de Hanks y Hill (1980) para el cálculo del rendimiento en función de la transpiración del cultivo. Cuando se compara con el

planteamiento que establece el rendimiento del cultivo en función de la evapotranspiración, el primero representa un avance del conocimiento en virtud de que involucra únicamente la cantidad de agua, extraída al suelo, que contribuye para la composición del rendimiento.

2.1.5 Dinámica del Sistema

El cambio diario de las variables que representan internamente al sistema es determinado por las variables exógenas (con excepción de la cantidad de fertilizantes aplicada) y a su vez determina la variación diaria de la transpiración del cultivo.

Al contenido de humedad de la capa superficial del suelo se le resta la lámina diaria de evaporación que, de acuerdo a Hanks y Hill (1980), puede ser expresada a través del decaimiento exponencial de la máxima evaporación del suelo (que ocurre cuando éste se ha humedecido recientemente), en función del número de días transcurridos a partir del último humedecimiento.

El suelo se humedece superficialmente a través de riego o lluvia, y la percolación profunda, en ambos casos, se evalúa a través del balance del agua en el perfil del suelo. Se considera que la lámina de riego aplicada penetra integralmente al perfil del suelo, y el modelo no contempla la posibilidad de pérdida a través del escurrimiento superficial. La lámina de lluvia infiltrable al suelo se determina a través del método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los E.U.A., para su cálculo.

La lámina de agua para la transpiración del cultivo se extrae de las capas donde hay raíces, con prioridad para aquellas donde el cultivo necesita realizar el menor esfuerzo para su extracción. De acuerdo a las ecs (4) y (5), en una determinada capa su valor es función del porcentaje de humedad aprove-

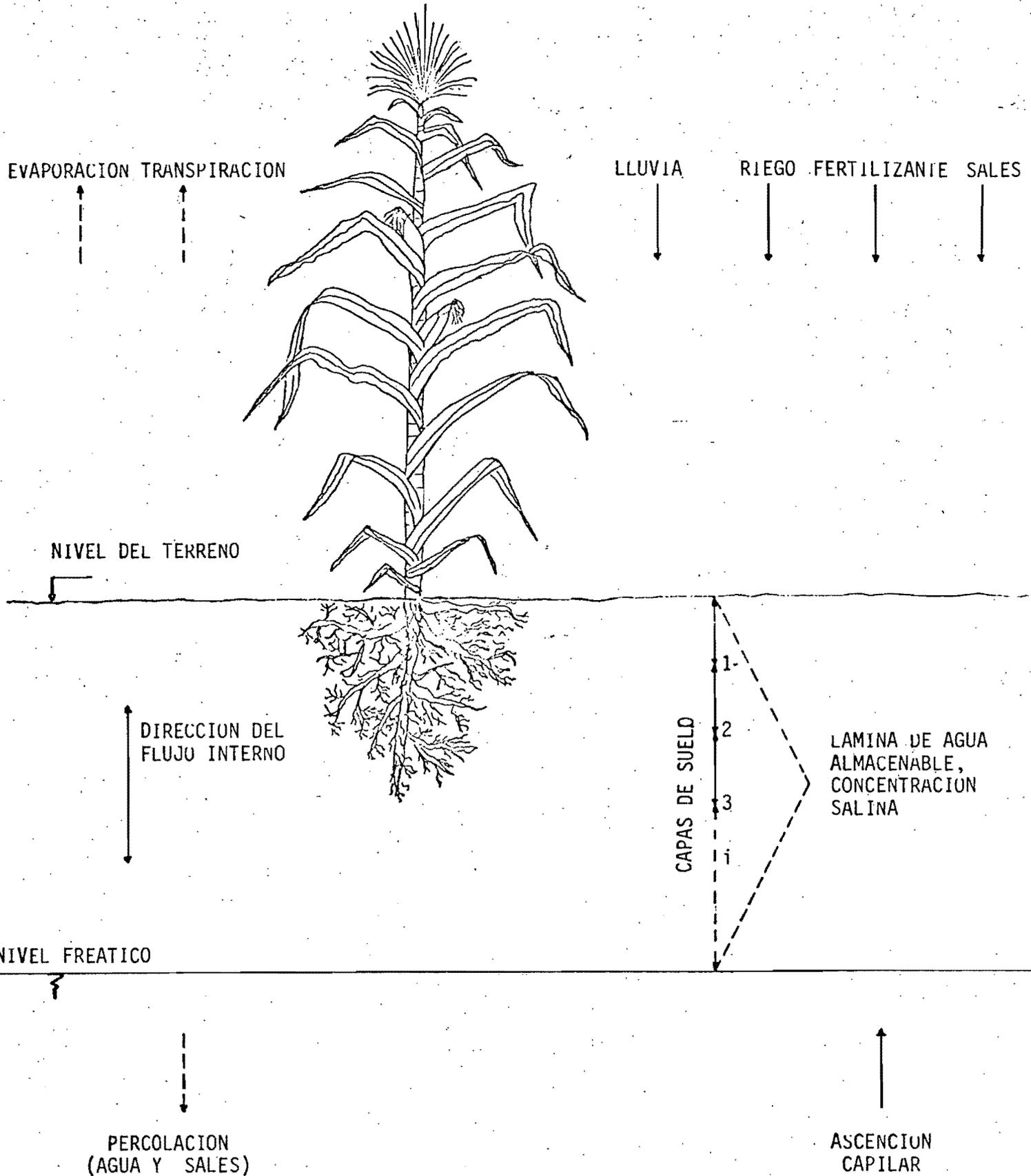
chable residual en el suelo, siempre que este valor sea inferior a un mínimo. Los contenidos de humedad aprovechable residual iguales o superiores a este límite, permiten la máxima transpiración del cultivo, que a su vez es función del estado de desarrollo del cultivo y del poder de evaporación de la atmósfera.

Dada la curva de retención del suelo, el límite de humedad aprovechable residual que permite la transpiración máxima del cultivo corresponde a una determinada tensión de succión del suelo. Sin embargo, la presencia de sales disueltas en el agua del suelo implican una presión osmótica que aumenta la tensión total, exigiendo de esta forma que el contenido de humedad aprovechable residual límite en los suelos salinizados, sea superior al límite establecido para los suelos no salinizados, a fin de que no haya una reducción en el rendimiento debida al sobre esfuerzo de tensión a que el cultivo estará sujeto. Se aclara que en este trabajo se consideran las presiones y tensiones a través de sus valores absolutos.

Para determinar la concentración de las sales en el perfil del suelo, con el objeto de evaluar su influencia sobre el rendimiento del cultivo, se realiza su balance de entradas y salidas, el cual además permite la redistribución de las cantidades que entran a través de la frontera superior, en el agua de riego, así como las que entran a través de la frontera inferior, en el agua proveniente del manto freático, que ha ascendido a través de la capilaridad. Además, se considera que puede haber importantes desplazamientos internos al perfil de simulación, de agua y sales, cuyo origen se debe a la diferencia entre las tensiones de succión del suelo, provocadas por la desigual extracción de humedad en cada una de las capas que constituyen el perfil de simula

FIGURA 1

REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL SISTEMA CONSIDERADO
PARA LA SIMULACION DEL RENDIMIENTO DEL CULTIVO



ción. Por último, a través de la frontera inferior salen las sales disueltas en el agua percolada.

2.2 Calibración del Modelo

El objetivo de realizar la calibración del modelo es actuar sobre parámetros (o conjunto de parámetros) de marcada importancia en la definición de la salida del sistema, modificándolos a fin de obtener un mejor ajuste entre los valores simulados y los observados.

En el presente modelo se considerará cambiar el valor de parámetros que intervienen en la estimación de la variable que define la salida del sistema (la transpiración) y en la interrelación que ésta mantiene con el rendimiento del cultivo.

El primer parámetro considerado es el nivel de humedad aprovechable residual mínimo en el suelo, para que la transpiración del cultivo sea igual a la transpiración máxima, esto es, el valor de b en la ecuación (4).

En segundo lugar está el conjunto de coeficientes empíricos α_i de la ec.(1), los cuales representan la importancia de la relación entre la transpiración del cultivo y la transpiración máxima, a cada etapa de su desarrollo. La inclusión de este conjunto de coeficientes, como parámetros de la calibración, se debe al carácter empírico de su determinación y la posible ocurrencia de cambios en sus valores con la variedad cultivada.

La aceptación de determinado conjunto de parámetros en detrimento de otros se define a través del procedimiento propuesto por Dent y Blackie (1979), los cuales sugieren realizar el análisis de regresión lineal entre los valores

simulados y aquellos observados, para evaluar el modelo. Posteriormente se determina el nivel de significatividad de la diferencia entre la ordenada en el origen calculada por la regresión y cero (valor correspondiente al ajuste perfecto), así como la significatividad de la diferencia entre la pendiente calculada y uno.

De acuerdo a estos resultados y al nivel de significatividad obtenido se acepta determinado conjunto de parámetros o se rechaza el planteamiento de la dinámica del sistema por ser incapaz de representar adecuadamente el sistema real.

2.3 Verificación del Modelo

La verificación del modelo se realiza en función de los atributos que se le van a exigir, esto es, poder representar el rendimiento de los cultivos en función de las políticas de riego adoptadas.

Además de verificar los rendimientos simulados se verifican las concentraciones salinas del extracto de saturación del suelo al final del ciclo de cultivo, así como la influencia que ésta ejerce sobre el rendimiento.

Para realizar la primera verificación se establecen políticas de riego que permitan que la humedad aprovechable antes de determinado riego baje hasta niveles pre-establecidos, y para la segunda verificación se aplican láminas de riego mayores o menores que las aplicadas originalmente en los tratamientos de los experimentos que sirvieron para la calibración del modelo.

2.4 Evaluación Económica

Para realizar la evaluación económica sobre un horizonte de planeación que

rebase el período considerado para la calibración y verificación del modelo (un ciclo de cultivo), se requiere establecer la simulación plurianual con el objetivo de representar una sucesión de ciclos de cultivo. Sin embargo, para realizar la simulación plurianual se requiere hacer algunas consideraciones.

La primera se refiere a las variables empleadas: las exógenas no controlables tendrán carácter determinístico, empleándose los registros históricos, en cuanto que las exógenas controlables son mantenidas constantes a lo largo del período de simulación, con excepción de los precios de los insumos y de comercialización de la cosecha.

En el período en que el suelo no está cultivado, es decir en el intervalo de tiempo comprendido entre dos ciclos sucesivos de cultivo, se mantiene invariable la dinámica del sistema, estando ausentes las relaciones que presuponen el desarrollo del cultivo. Además, a lo largo del período de simulación se mantiene constante no sólo la especie como también la variedad cultivada en cada una de las localidades consideradas.

En lo que respecta a la evaluación económica, se calculan los valores presentes de los beneficios netos a lo largo del período de simulación, para cada una de las políticas de riego consideradas. Estos valores diferirán entre sí en función de las láminas totales de riego aplicadas (a lo largo del período de simulación) del precio de los insumos y de comercialización de la cosecha. Finalmente, se puede determinar la política de riego que proporciona el mayor valor presente de los beneficios netos para diferentes precios unitarios del agua de riego.

3. EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS BAJO LA INFLUENCIA DEL AGUA, FERTILIDAD Y SALINIDAD DEL SUELO.

3.1 La Transpiración y el Rendimiento Relativo

Son dos motivos fundamentales por los cuales en el presente trabajo se relaciona el rendimiento relativo de los cultivos con su transpiración; el primero es el hecho de conocer diariamente y en cada etapa de desarrollo del cultivo, el efecto que el déficit de agua en el suelo produce en el rendimiento relativo. El segundo motivo se asocia con la posibilidad de considerar el efecto de la salinidad presente en el suelo como un factor que actúa, diariamente, sobre la transpiración del cultivo y consecuentemente sobre su rendimiento relativo.

El modelo que se presenta a continuación, para la representación del rendimiento relativo de la producción de granos, fue establecido en 1968 por M.E. Jensen, adoptado por Hanks (1974) y presentado por Hanks y Hill (1980). En particular, con respecto a este modelo, Hanks y Hill (1980) afirman que no se obtienen tan buenos resultados cuando se representa el rendimiento en grano, como los que se obtienen en materia seca, ya que el modelo que representa este último rendimiento no requiere el establecimiento de relaciones parciales a cada etapa de su desarrollo. Además, estos autores indican que el rendimiento en grano es más sensible a la fecha en que se realiza la siembra y que ya se han hecho intentos de mejorar el modelo a través de la inclusión de la acumulación de grados - día para el establecimiento de las etapas de desarrollo del cultivo, así como de un factor que considere el retraso en la fecha de siembra.

En el presente trabajo, además de tomarse en cuenta los dos aspectos mencionados anteriormente, se incluye la consideración del efecto de la salinidad, también a nivel diario, y de la eficiencia de la fertilidad a diferentes niveles de humedad del suelo (este último a nivel de ciclo del cultivo).

Inicialmente se presenta el modelo tal como Hanks y Hill (1980) lo representaron, para posteriormente incluirse las modificaciones requeridas, tanto a nivel teórico así como de los datos para la calibración del modelo que dependen de la localización del área de estudio.

La relación entre el rendimiento Y en grano de un cultivo seleccionado y su rendimiento máximo (Y_M) se establece en función de la relación entre la transpiración (T) del cultivo y la transpiración máxima (T_M) que ocurriría si la humedad del suelo no fuera limitante. Por lo tanto, la ecuación que relaciona

el rendimiento relativo con la transpiración relativa se expresa, según Hanks y Hill (1980), por:

$$Y/YM_{\text{GRANO}} = (T/TM)_1^{\alpha_1} \cdot (T/TM)_2^{\alpha_2} \cdot (T/TM)_3^{\alpha_3} \cdot (T/TM)_4^{\alpha_4} \dots \\ \dots (T/TM)_m^{\alpha_m} \quad (1)$$

donde los índices del 1 al m representan las etapas de desarrollo del cultivo y los valores de α_i son pesos empíricos que representan la importancia de la relación $(T/TM)_i$ en cada etapa. Las condiciones para obtener el rendimiento máximo (YM) se discutirán más adelante.

Según Hanks y Hill (1980), la definición de la etapa de desarrollo del cultivo puede ser establecida a través de la acumulación de grados-días, empleándose las temperaturas máximas y mínimas diarias. No obstante que Flinn (1971) (basado en el trabajo de Leng) indica que las etapas de desarrollo del maíz pueden ser establecidas por la suma de la diferencia entre la temperatura máxima diaria y 56° F, esta temperatura de referencia depende del cultivo y su variedad, así como de las condiciones climatológicas del área cultivada. Esta información puede ser considerada como dato de entrada al modelo si se tiene disponible. Cuando no se dispone de esta temperatura de referencia, así como los criterios para la definición de la acumulación de grados-día y los valores límites para cada etapa de desarrollo, estas serán definidas por el período transcurrido, en días, desde la siembra.

Para las condiciones de Logan-Utah, E.U.A., Hanks y Hill (1980) han adoptado para el maíz sembrado el 28 de mayo de 1975, los períodos de 20, 43, 12, 12 y 41 días de duración para las etapas de 1 al 5, con correspondientes valo

res de α_1 : 0.0: 0.4: 0.4: 0.4: y 0.0, que corresponden a las siguientes etapas de desarrollo: emergencia, crecimiento, floración, formación del grano y madurez.

Como ya se ha dicho, en su versión original el modelo presentado por Hanks (1974) no hace consideraciones sobre la fecha de siembra del cultivo. El efecto de este parámetro está asociado con las condiciones locales en que se desarrolla el cultivo y a manera de ejemplo Flinn (1971) indica que en los E.U.A., cuando se siembra maíz después de una fecha límite, es común que ocurra una reducción en el rendimiento máximo de aproximadamente 0.7% de su valor por cada día de retraso en sembrar este cultivo.

La dificultad que se presenta para la aplicación de la ecuación (1) es la factibilidad de separar la evaporación de la transpiración, ya que los datos disponibles son la evaporación local (corregida de tanque clase A) (E_o) y las relaciones entre la evapotranspiración máxima (ETM) y E_o , las cuales se pueden encontrar en Doorenbos y Pruitt (1977) y en SRH (1970).

Para establecer la separación mencionada, Hanks (1974) considera que la transpiración máxima (TM) del maíz es cero en el transcurso del período que va desde la siembra hasta el inicio del crecimiento. Posteriormente el valor de TM, a lo largo de todo el ciclo del cultivo, se considera aproximadamente igual al 90% de ETM.

Si se conoce E_o y TM, la evaporación máxima E_m se obtiene a través de:

$$E_m = E_o - TM, \quad (2)$$

y se propone que la evaporación del suelo (E), para la condición de humedad

existente t días después de haberse humedecido (riego o lluvia), se expresa a través de:

$$E = E_m/t^{1/2} \quad (3)$$

La relación propuesta por Hanks (1974) para la determinación de la transpiración del cultivo, en función del contenido de humedad del suelo y la transpiración máxima, es:

$$T = \frac{TM}{b} * \frac{CAS}{AD}, \text{ si } \frac{CAS}{AD} < b \quad (4)$$

$$T = TM, \text{ si } \frac{CAS}{AD} > b \quad (5)$$

donde CAS es la cantidad de agua disponible en el suelo y AD es la máxima cantidad de agua disponible en el suelo, ambos por arriba del punto de marchitamiento permanente. Según Hanks (1974) el valor de b es una fracción menor que uno y cuando el valor de b es igual a cero (situación en la que la ecuación (4) no tiene sentido), representa el modelo denominado de crecimiento - no crecimiento.

Al intentar validar las ecuaciones (4) y (5), Hanks (1974) obtuvo un mejor ajuste al emplear el valor de b igual a cero, que b igual a 0.5. Esto se debe al hecho de que cuando se presentan lluvias ligeras éstas humedecen hasta la capacidad de campo solamente una capa superior de suelo, donde las raíces pueden más fácilmente extraer agua, lo que hace que el valor de la transpiración real sea igual a la transpiración máxima.

El modelo denominado de crecimiento - no crecimiento, en la situación descrita anteriormente, permite concluir la ocurrencia de crecimiento en este período

do de análisis. Entre tanto, cuando se emplea el valor de b igual a 0.5, para esta misma situación, el modelo indicará el no crecimiento durante este período. Si el suelo se considera como una capa única y su cantidad de agua disponible es baja antes de una lluvia ligera, y ésta no hace que la relación CAS/AD se incrementa a un valor mayor de 0.5, entonces el modelo propuesto por Hanks (1974) considera la situación (no real) de no crecimiento.

Según Hanks y Hill (1980), para evitar el error descrito anteriormente, se requiere considerar la presencia de varias capas de suelo a lo largo de la profundidad radicular, con aplicación de las ecuaciones (4) y (5) para cada una de las capas consideradas.

El valor de b puede ser asociado con el mínimo contenido de humedad aprovechable en el suelo que, cuando se observa a lo largo de todo el ciclo del cultivo, permite la obtención del rendimiento máximo. Si el contenido de humedad aprovechable es inferior al límite de b puede resultar en castigo del cultivo.

En el modelo de considera (Hanks (1974)), que el agua consumida por la evaporación disminuye el contenido de humedad de la capa superficial del suelo, con la restricción de que esta humedad tiene como valor mínimo la lámina de agua que el suelo puede almacenar cuando se le seca en presencia de la humedad contenida en la atmósfera.

A su vez, el cultivo al transpirar retira humedad, según Hanks (1974), de una o dos capas de suelo, donde es mayor la relación CAS/AD. El procedimiento para su determinación se describe en la Subrutina Transp, en el anexo II.

Un dato adicional que se requiere, para realizar los cálculos anteriores, es la profundidad alcanzada por las raíces. Hanks y Hill (1980) han empleado la relación:

$$PR = PM / (1 + \exp(6 - 12 * t / RD)), \quad (6)$$

donde PR es la profundidad radicular alcanzada t días después de la siembra, PM es la máxima profundidad radicular y RD es el número de días necesarios para que la profundidad radicular sea la máxima para el cultivo.

Finalmente, para conocer el valor de la cantidad de agua disponible en el suelo (CAS), se requiere establecer una ecuación que represente el balance del agua en el suelo, que es el tema del capítulo 4.

3.2 Obtención del Rendimiento Máximo

En el modelo propuesto, representado por la ecuación (1), se requiere definir un rendimiento máximo YM para la determinación del rendimiento simulado.

El nivel de uniformidad en la determinación de los valores de YM permite únicamente afirmar que este se obtiene bajo la condición de que el nivel de humedad del suelo no limite la transpiración del cultivo, lo que, según las ecuaciones (1), (4) y (5), para un valor de b igual a 0.5, significa no permitir la reducción del contenido del agua del suelo a niveles inferiores al 50% de la humedad aprovechable, en las capas donde el cultivo extrae humedad, en todas las etapas de su desarrollo.

En cuanto a la relación entre los fertilizantes y el rendimiento del cultivo, por lo general los modelos matemáticos similares a éste se abstienen de mencionar tal interacción (Hanks y Hill (1980), Feddes y otros (1978), Flinn

(1971)), y cuando lo hacen no representan de forma explícita las bases sobre las cuales se apoyan estas relaciones, limitándose a mencionar que se adopte el planteamiento de un autor determinado (Sánchez B. (1975), Sánchez B. y Otros (1978), Dumsday (1971)).

Es muy probable que lo anterior se deba a la gran cantidad de factores que intervienen en la relación de fertilización y rendimiento del cultivo, además de la actual imposibilidad de establecer relaciones generalizadas, extrapolables a otras regiones.

Dentro de los factores que afectan la eficiencia de los fertilizantes se puede mencionar la variedad cultivada, características del suelo (nivel de fertilización residual, PH, salinidad, entre otros factores), humedad del suelo, condiciones atmosféricas, formas de distribución temporal del fertilizante, etc.

La interacción del fertilizante con los niveles de salinidad y humedad del suelo se discuten en las siguientes secciones.

Según Anderson y otros (1982), todo el nitrógeno aplicado al suelo cultivado con maíz, en condiciones de irrigación limitada y en suelos de textura media o fina, deberá ser aplicado en el período de pre-plantío. Si la aplicación se realiza durante el ciclo de cultivo, el rendimiento puede ser menor que el que se obtiene con la aplicación integral previa a la siembra.

En cuanto a los modelos que consideran la respuesta del rendimiento de los cultivos a los fertilizantes, hasta la fecha no se ha normalizado tal procedimiento, a pesar de que los coeficientes de determinación para la mayoría de los diversos modelos propuestos indiquen valores muy cercanos a la unidad.

Dentro de los modelos más usuales se encuentran el de Mitscherlich, propuesto en 1909 y los polinómiales, principalmente los de segundo grado, además del modelo exponencial de Cobb-Douglas que presenta menores coeficientes de determinación que los demás (French (1956), Huszar y otros (1970)).

El modelo de Mitscherlich fue objeto de investigación de Mombiela y Nelson (1981) y concluyeron que su empleo es apropiado para la representación de la respuesta de los cultivos a los fertilizantes. Este modelo está representado por:

$$Y = A \left[1 - e^{-c(x+d)} \right] \quad (7)$$

donde Y es el rendimiento que se obtiene cuando se aplica x unidades del fertilizante y hay d unidades de este disponibles en el suelo antes de la aplicación de las x unidades, C es un factor denominado eficiencia del fertilizante y A es el máximo rendimiento, asintótico, que se puede obtener bajo la condición de no castigar el cultivo con déficit de humedad en el suelo.

El modelo de Mitscherlich presenta dos desventajas, la primera de ellas se refiere a su forma exponencial, con un rendimiento máximo asintótico, sin que se presente un punto máximo con reducción del rendimiento para aplicaciones excesivas de fertilizante (lo que se prevee por el modelo polinomial de segundo orden debido a que la señal del coeficiente multiplicador de la variable con exponente cuadrático es negativo y la curva de respuesta presenta una concavidad hacia abajo, con un punto máximo claramente definido). La segunda es que el modelo de Mitscherlich no permite la interacción entre dos o más factores (fertilizantes por ejemplo) en la representación de la respuesta de los cultivos a estos factores.

De cualquier modo, cualquiera que sea el modelo de respuesta empleado, uno de los puntos fundamentales que se requiere para la estimación de la respuesta de determinado cultivo a una aplicación de fertilizante, es que el modelo tome en cuenta el nivel de fertilización residual existente en el suelo antes de la nueva aplicación. Jensen y Pesek (1959), Voss y Pesek (1962) Roberts y otros (1980), Mombiela y otros (1981) han propuesto métodos para la incorporación de los niveles de fertilización del suelo.

Cuando no se incorporan los niveles de fertilización residual al modelo de respuesta de los cultivos, este tendrá validez únicamente para el ciclo de cultivo analizado. En tanto que el modelo de respuesta del cultivo a la fertilización haya considerado los niveles de fertilización residual en el suelo y se haga su medición en cada ciclo, conociéndose la cantidad de fertilizante que se aplica es posible conocer el rendimiento máximo del cultivo, requerido en la ecuación (1).

3.3 Efecto de la Salinidad en el Rendimiento de los Cultivos

En esta sección inicialmente se hacen consideraciones edafológicas con objeto de evaluar la interacción del efecto de las sales sobre el rendimiento de los cultivos.

Posteriormente, se analiza y discute un modelo que establece relaciones generalizadas a nivel del ciclo de cultivo, entre el efecto de la concentración de sales en el extracto de saturación del suelo y el rendimiento.

Por último, se proponen modificaciones a la ecuación (4), para que la transpiración T del cultivo también sea afectada por la concentración de sales en la zona radicular.

3.3.1 Teorías y Clasificación del Efecto de las Sales en los Cultivos

La tolerancia de los cultivos a las sales ha sido intensamente investigada, con un grado de uniformidad tal que permite la elaboración de análisis cualitativos y cuantitativos, presentados en extensa bibliografía (véase a Maas y Hoffman (1977), Ayers (1977), Aceves (1981), entre otros). El trabajo de Maas y Hoffman (1977), puede ser visto como la culminación de estas investigaciones, en lo que se refiere a una de las dos grandes teorías que se han desarrollado con respecto a la tolerancia de los cultivos a las sales.

La Organización Agrícola para la Alimentación (Food and Agricultural Organization) (FAO, 1973) considera que una de las teorías del efecto perjudicial de las sales es debida a la presión osmótica de la solución contenida en el suelo la cual, cuando alcanza valores extremadamente altos, puede destruir la capacidad del cultivo de intercambiar agua, tanto con la atmósfera como con el suelo; para la otra teoría el perjuicio se debe a la acción tóxica de iones específicos acumulados en la solución del suelo, sobre el metabolismo del cultivo, es decir a su efecto directo sobre su protoplasma.

Según la FAO (1973), para Bernstein los efectos de las sales pueden ser clasificados en:

- a) Efecto osmótico general a través del cual el decaimiento en el crecimiento, o perjuicio de la calidad, son determinados por la presión osmótica del medio, en ausencia de los efectos de iones específicos.
- b) Efectos específicos de iones que restringen la capacidad del cultivo de absorber nutrientes de la solución del suelo, los

cuales hacen decaer el crecimiento o el rendimiento, y perjudican más la calidad que el solo efecto osmótico general que se produce en el medio.

Con respecto a estos efectos nutricionales de iones específicos, Jurinack y Wagenet (1981) indican que la nitrificación de fertilizantes nitrogenados que se hayan aplicado bajo forma química que no esté disponible al cultivo, como la urea, o de reducida movilidad, como son las sales de amonio, es realizada a través de proceso microbiológico en el suelo, el cual depende del tipo y la concentración de sales.

Sin embargo, estos últimos autores indican que este efecto puede ser minimizado a través del empleo de fertilizantes nitrogenados que no requieran ser nitrificados para estar disponibles a los cultivos, como el nitrato de calcio, entre otros.

- c) Efectos tóxicos que causan síntomas característicos de daño, asociados con la acumulación de un ion específico en el cultivo (quemaduras en las hojas debido al sodio y al cloro, de muchos árboles frutales).

La acumulación de iones específicos en el cultivo puede, según la FAO (1973), ser explicado por el cese, a partir de un nivel de concentración de sales en el suelo, de la impermeabilización de los tejidos radiculares, la cual establece una barrera a las sales y al agua. Cuando ocurre este cese de la impermeabilización el proceso de absorción de las sales deja de ser selectivo, de-

bido a los daños en el protoplasma del cultivo y consecuentemente, ocurre la acumulación de sales en los órganos del cultivo.

En este mismo trabajo de la FAO (1973) se concluye que ni la teoría osmótica, ni la de toxicidad salina pueden, solas, explicar la diversidad de resultados obtenidos en experimentos con varios cultivos y especies. En algunos casos el efecto de la salinidad puede ser explicado por la teoría osmótica y en otros por la teoría de la toxicidad iónica. Entre tanto, en muchos casos ambos procesos influyen conjuntamente en el crecimiento y rendimiento del cultivo.

La concepción teórica del trabajo de Maas y Hoffman (1977) va de acuerdo con esta conclusión, a pesar de que, debido a la pequeña disponibilidad de datos referentes al efecto específico de los iones en el crecimiento y rendimiento de los cultivos, los datos por ellos presentados correlacionan la respuesta de los cultivos a la cantidad total de sales solubles en el medio radicular, esto es, consideran únicamente el efecto de la presión osmótica. Entre tanto, estos mismos autores apuntan que, cuando existan, deben ser considerados los efectos de toxicidad de iones específicos, sodificación del suelo y efectos de las sales en la nutrición de los cultivos.

Este último aspecto se debe a que el efecto de iones específicos puede reducir la absorción de nitratos por los cultivos, como ya se ha planteado anteriormente. Aún sobre este aspecto, el trabajo de la FAO (1973) menciona la necesidad de diferenciar entre la salinidad debido al cloro y aquella originada por sulfatos.

Además, hace falta mencionar que no todas las partes del cultivo son afecta-

das de modo igual. Según Maas y Hoffman (1977), el crecimiento de la parte aérea de los cultivos frecuentemente sufre mayores reducciones que el sistema radicular y el crecimiento vegetativo frecuentemente no representa la futura producción de frutos y semillas. Estos autores indican que el rendimiento en granos de arroz y maíz pueden ser altamente reducidos sin que la producción de paja sea prácticamente afectada. Para otros cultivos como cebada, trigo y algodón la producción de semillas o fibras pueden decaer más que el crecimiento vegetativo. Por último, se menciona que cualquier correlación entre la respuesta del crecimiento del cultivo con la salinidad del suelo, debe considerar este crecimiento diferenciado.

3.3.2. Factores que Influyen en la Tolerancia de los Cultivos a las Sales.

La tolerancia de los cultivos a las sales es frecuentemente expresada, según Maas y Hoffman (1977), como la reducción en el rendimiento esperado del cultivo, para un determinado nivel de sales solubles en el medio radicular, comparado con el rendimiento que se obtendría bajo condiciones de no salinidad. Debido a la gran cantidad de factores que interaccionan en las relaciones del cultivo-suelo-agua-atmósfera, no se pueden obtener tolerancias absolutas que reflejen el valor esperado de la respuesta fisiológica inherente del cultivo. Por lo tanto, el primer factor que influye en la tolerancia relativa del cultivo a las sales, es la condición ambiental bajo la cual se desarrolla el cultivo. Este último aspecto está relacionado con la fisiología vegetal y la capacidad de adaptación del cultivo al medio y no se desarrolla en este trabajo.

Se puede mencionar como otros factores que pueden influir en la tolerancia de los cultivos a las sales: la especie cultivada, su etapa de desarrollo, la

concentración y composición de las sales disueltas en la solución del suelo, el régimen de suministro del agua al suelo (política de riego, lluvia) y la fertilidad del suelo.

Además de estos factores presentados por FAO (1973), Maas y Hoffman (1977) consideran importante la aireación del suelo, la distribución radicular (en el caso de árboles frutales y viñedos), la temperatura, la humedad y la contaminación atmosférica.

Más adelante se discutirán los factores inicialmente mencionados, por considerar que son los más importantes, con excepción del relativo a la composición de las sales disueltas en la solución del suelo, por motivos anteriormente mencionados.

Las consideraciones que aquí se hacen, con respecto a los factores que pueden influir en la tolerancia de los cultivos a las sales, son principalmente tomadas de Maas y Hoffman (1977).

Inicialmente se puede decir que no es común que la variedad interfiera en la tolerancia de los cultivos. Sin embargo, dentro de los granos la tolerancia del arroz cambia ampliamente con la variedad; asimismo, la soya tiene diferentes respuestas a la salinidad y pueden haber cambios entre las variedades de trigo y cebada.

La salinidad afecta todas las etapas del desarrollo del cultivo (incluso puede limitar la germinación) y en algunos casos el efecto puede ser diferente en cada una de las etapas. Se menciona que el arroz es tolerante durante la germinación, pero es muy sensible al inicio de la etapa de crecimiento, para posteriormente incrementar su tolerancia con la maduración. Maas y Hoffman

(1977) apuntan divergencias en la literatura con respecto a la tolerancia de este cultivo en la etapa de floración cuando, para Pearson y Bernstein, el arroz vuelve a ser otra vez sensible a las sales en el período de polinización y de fertilidad, con el desacuerdo de Kaddah y compañeros de trabajo.

La cebada, el trigo y el maíz son más sensibles en las etapas de emergencia e inicio del crecimiento, que en la germinación y etapas posteriores de crecimiento y formación del grano. Como se ha dicho, la tolerancia de la soya es función de la variedad cultivada y así su tolerancia desde la germinación hasta las etapas posteriores del crecimiento puede crecer o disminuir.

El régimen de suministro de agua al cultivo no afecta propiamente su tolerancia a las sales. La forma de actuar de este factor es a través del cambio de la concentración salina del sustrato y cuando llueve o hay un riego la concentración de las sales es mínima y si se considera mínima o nula la absorción de sales por el cultivo, al disminuir el contenido de agua debida a la evapotranspiración, la solución del suelo tendrá mayor concentración de sales disueltas.

Una política de riego que castigue más al cultivo que otra, hará que la concentración media de sales a lo largo del ciclo de cultivo sea más alta.

La fertilidad del suelo puede actuar bajo dos formas en la tolerancia de los cultivos a las sales, la primera es a través de la aplicación de un exceso de fertilizantes y se discute en la próxima sección. La otra forma por la cual la fertilización aparentemente afecta la tolerancia de los cultivos a las sales se debe a que la reducción en el rendimiento relativo del cultivo que se desarrolla en un suelo salinizado, con baja fertilidad, es mucho menor

que la reducción correspondiente que se observa en un suelo adecuadamente fertilizado y con problemas de salinidad.

El fenómeno de incremento de la tolerancia del cultivo a las sales es aparente, ya que el factor limitante del rendimiento en el suelo no salinizado (testigo para establecer la tolerancia del cultivo) es el nivel de fertilidad, y no la salinidad. Según Maas y Hoffman (1977) es obvio que la fertilización incrementa el rendimiento absoluto, aunque esto pueda significar una reducción en la tolerancia del cultivo a las sales.

El efecto de la concentración de las sales en el medio radicular se discute a continuación y se hace el análisis del planteamiento que relaciona el rendimiento relativo a través de la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo.

3.3.3 Relaciones Generalizadas Entre el Rendimiento del Cultivo y el Efecto de la Concentración de las Sales del Suelo.

Maas y Hoffman (1977) presentan una extensa tabla que contiene la tolerancia de los cultivos a las sales, la cual se basa únicamente en dos factores: la salinidad máxima permisible sin que haya reducción del rendimiento, comparado con el que se obtiene bajo la condición de no salinidad del suelo y la tasa de reducción (en porciento) del rendimiento, para cada unidad de incremento de la salinidad a partir del límite apuntado anteriormente. Los valores presentados en la tabla mencionada están expresados en rendimientos totales y rendimientos en granos, para diversos cultivos.

La forma por la cual los autores mencionados consideran el efecto de la concentración de la salinidad sobre el rendimiento relativo de los cultivos es

a través de la medición de la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (CE_e), sin tomar en cuenta el efecto de iones específicos.

De esta forma, la reducción en el crecimiento es debida exclusivamente al aumento de la presión osmótica en la solución del suelo, en la zona radicular.

El empleo de la CE_e se debe a que es una forma fácil para determinar la concentración de sales en el suelo, hace posible uniformizar la información, además de relacionar el rango de humedad de una amplia gama de texturas de suelos agrícolas. Otra ventaja de establecer la concentración de sales en el suelo, a través de la medición de la conductividad eléctrica, es la relación que se puede establecer con la presión osmótica. Tal relación se expresa por $\psi_o = 0.36 CE$ (en valor absoluto).

donde:

ψ_o es la presión osmótica en atmósferas y

CE es la conductividad eléctrica en mmhos/cm a 25°C

Con el dato de la conductividad eléctrica del suelo, se puede usar la tabla presentada por Maas y Hoffman (1977) a partir de la cual se puede obtener el rendimiento relativo del cultivo para valores de $CE_e > A$, la cual se expresa por:

$$Y = 100 - B (CE_e - A) \quad (8)$$

donde

Y es el rendimiento relativo en porcentaje

B es la tasa de reducción del rendimiento para cada unidad de incremento de la salinidad y

A es el valor límite de salinidad en mmhos/cm a 25°C, a partir del cual hay reducción del rendimiento.

La información recopilada por Maas y Hoffman (1977) para establecer las correlaciones entre la concentración total de sales en el suelo y el rendimiento relativo, abarca un período de 30 años (hasta 1975) y se obtuvo de experimentos realizados en suelos, arenas y agua; en el campo, macetas e invernaderos; y bajo aproximadamente cualquier medio ambiente concebible. Además, la respuesta de los cultivos a la salinidad fue medida por varios métodos y a diferentes etapas de crecimiento y desarrollo. A pesar de esto, los autores mencionados pudieron linearizar la relación presentada en la ecuación (8).

Con objeto de minimizar la ambigüedad de interpretación de los resultados, que podrían ocurrir en perfiles salinos no uniformes, los datos de tolerancia de los cultivos derivados por el Laboratorio de Salinidad de los E.U.A. (aparentemente la principal fuente de datos de los autores mencionados), fueron obtenidos a partir de experimentos realizados en el campo, con salinización artificial, donde la salinidad fue mantenida uniforme en toda la profundidad de la zona radicular.

Tal uniformidad fue obtenida con aplicaciones de altas cantidades de agua para la lixiviación, para diferentes concentraciones salinas. Se hace notar que los tratamientos salinos fueron frecuentemente efectuados después de transcurridas las etapas de germinación e inicial de crecimiento.

Los datos mencionados provenientes del Laboratorio de Salinidad de E.U.A., se obtuvieron bajo fertilidad óptima para condiciones de suelos no salinizados.

Para obtener la evaluación numérica de la tolerancia de los cultivos a las

sales, que se puede establecer con la ecuación lineal del rendimiento relativo, Maas y Hoffman (1977) ajustaron los datos disponibles a través del método de los mínimos cuadrados. Evidentemente los datos empleados para este ajuste fueron aquellos superiores al límite correspondiente al valor de A de la ecuación (8).

Cuando se tomó en cuenta más de un experimento para establecer la tolerancia a las sales de un determinado cultivo, la ordenada en el origen y la pendiente de la recta se promediaron.

3.3.4 Discusión del Modelo Propuesto por Maas y Hoffman.

Los autores del modelo indican que los resultados serían mucho más reales si las mediciones de salinidad fueran hechas en la solución del suelo, con el rango de humedad que se verifica en el campo. Efectivamente, la determinación de la conductividad eléctrica que debe ser empleada, para el establecimiento del rendimiento relativo, aún es motivo de investigación.

Según Maas y Hoffman (1977) la distribución de las sales en el suelo varía tanto en el espacio (aquí se está considerando únicamente el perfil vertical, cuando también puede ocurrir la variación espacial propiamente dicha), como en el tiempo.

En función de la cantidad de agua destinada para la lixiviación, el perfil vertical puede ser uniforme o no uniforme y varía de concentraciones aproximadamente iguales a las del agua de riego en la superficie, a concentraciones mucho mayores en el fondo del sistema radicular. La distribución temporal de la salinidad se debe a la lluvia y a la política de riego, como se mencionó anteriormente.

De acuerdo a Ayers (1977), la conductividad eléctrica que debe ser empleada para la evaluación de la tolerancia de los cultivos a las sales, corresponde al promedio de la conductividad eléctrica del agua del suelo en la zona radicular. Sin embargo, Maas y Hoffman (1977) indican que para la alfalfa se obtiene mejores correlaciones del rendimiento relativo, con la salinidad expresada a través de la integración temporal a lo largo del ciclo de cultivo, de la conductividad eléctrica del agua del suelo, que con el valor de la conductividad del extracto de saturación.

Se debe a Bernstein y Francois (mencionados por Maas y Hoffman (1977)) la mejor explicación aparente para la selección de la conductividad eléctrica requerida. Es *"debido a que la absorción del agua está inversamente relacionada con la concentración de sales, que mayores cantidades de agua son absorbidas en la zona radicular superior y consecuentemente, el promedio ponderado de la salinidad es más influenciado por la concentración del agua de irrigación que por las altas concentraciones del agua de drenaje"*.

Maas y Hoffman (1977) parecen estar de acuerdo con Bernstein y Francois, en la medida en que opinan: *"Si la respuesta de todos los cultivos es principalmente gobernada por la salinidad del agua de riego, que por la salinidad promedio del suelo, entonces los datos de tolerancia a las sales obtenidos a partir de perfiles uniformes de salinización pueden ser aplicados directamente para las condiciones no uniformes, a través de la medición de la salinidad del agua del suelo en la zona de máxima absorción de agua"*.

Un procedimiento de balance diario del agua del suelo, como el que requiere la presente simulación y que se establece en el siguiente capítulo, permite la determinación de las concentraciones salinas en el suelo, a nivel diario,

y soluciona la determinación de la conductividad eléctrica que debe ser empleada en la ecuación (8), para la representación de las condiciones de campo.

Sin embargo, este no es el punto fundamental que limita el empleo del análisis y la propuesta de evaluación de la tolerancia de los cultivos a las sales hechos por Maas y Hoffman (1977). El punto fundamental está asociado con la característica textural del suelo salinizado y se desarrolla en la próxima sección.

3.3.5 Propuesta de Inclusión del Efecto de la Salinidad del Suelo Sobre la Transpiración del Cultivo.

Puesto que se considera el incremento de la presión osmótica como el único efecto debido a la salinidad, este efecto puede ser involucrado con la transpiración del cultivo, la cual se establece inicialmente a través de las ecuaciones (4) y (5).

En estas ecuaciones, cuando el contenido de agua disponible en el suelo es superior a la mitad del agua aprovechable, en todo el ciclo de cultivo, se obtiene el máximo rendimiento. En tanto, este mismo suelo tendrá mayor tensión total de succión, para el mismo nivel de humedad; si se encuentra salinizado, y el cultivo presentará rendimientos inferiores al máximo en función de su nivel de salinización.

El efecto de la salinidad en el rendimiento de los cultivos está asociado a la textura del suelo ya que al considerar, según la teoría osmótica, que el efecto de la salinidad actúa únicamente a través del incremento de la tensión de succión del suelo, un nivel de salinidad dado corresponde a diferentes re

ducciones del nivel de humedad disponible en el suelo, siendo que, a bajas tensiones, en general es mucho mayor el efecto de este incremento en los suelos arenosos que en los arcillosos.

De lo anterior se puede concluir que ni la ecuación (8) ni cualquier fuente de datos que pretenda establecer la tolerancia de los cultivos a las sales, puede dejar de especificar su validez en función de la textura del suelo.

Es así que la propuesta que se hace a continuación involucra directamente parámetros asociados a la textura del suelo.

A través de ecuaciones de balance de agua y sales en el suelo se puede determinar las concentraciones salinas en cada capa de suelo considerada. Estas concentraciones salinas pueden ser asociadas con la presión osmótica (Mc Neal (1981)) y para una cantidad dada de agua disponible en el suelo, a través de la curva de tensiones-contenido de humedad en el suelo, se puede determinar la tensión correspondiente.

Si se suma a esta tensión la correspondiente al valor absoluto de la presión osmótica debida a las sales, se obtiene la tensión de succión total y de la misma curva anterior se obtiene un nuevo valor para la cantidad de agua disponible en el suelo.

Este valor no representa el nivel real de humedad del suelo y tampoco se considera en su balance de agua, pero es como si para el cultivo la cantidad de agua disponible hubiera bajado hasta este nivel y por lo tanto, este es el valor de CAS que debe ser empleado en la ecuación (4).

Con las ecuaciones de balance de agua y sales se podrá representar la no uniformidad de la distribución temporal y espacial (unidimensional) de la sali-

nidad, las cuales estarán representadas en el modelo para obtener el rendimiento relativo de los cultivos.

Al analizar el aspecto de la salinidad bajo este punto de vista se puede obtener altos rendimientos, incluso el rendimiento máximo, en función de la política de riego empleada, el grado de salinización del suelo y las condiciones atmosféricas.

Lo anterior tiene validez bajo la hipótesis formulada anteriormente, de que la salinidad actúa exclusivamente a través del incremento de la presión osmótica. Una extensión de este planteamiento permite sustituir la concepción de la tolerancia de los cultivos a las sales, por la de un valor límite de tensión total de succión del suelo que el cultivo es capaz de contrarrestar sin sufrir reducción en su rendimiento debido a este esfuerzo. Tal es el planteamiento empleado en este modelo, a nivel numérico, aunque en la siguiente sección se siga empleando el de tolerancia de los cultivos a las sales.

Por último, racionalizando en términos energéticos, se puede decir que la reducción en el rendimiento, esto es, la pérdida de energía o producción, se debe al incremento del trabajo que el cultivo necesita realizar para extraer la humedad del suelo.

3.4 Efecto de la Fertilización en el Nivel de Salinización de los Suelos

Según Bernstein y otros (1974) el potasio (K) como nutriente puede ser reducido a un bajo nivel de aplicación, en suelos salinizados, sin afectar el rendimiento de la mayoría de los cultivos, debido a que éstos pueden absorberlo

por medios propios de la solución del suelo, pese a que esté disponible a bajas concentraciones o en presencia de altas concentraciones de otros cationes (Jurinak y Wagenet (1981)), y a pesar de que Lunin y Gallatin (1965) han indicado que la fertilización con este nutriente puede incrementar el nivel de salinización del suelo, debido a su reducido nivel de aplicación no se considera la influencia de este nutriente en la evaluación que se pretende desarrollar, limitándose este trabajo a considerar los efectos de la fertilización con nitrógeno y fósforo (N y P).

El objetivo de la presente sección es evaluar el efecto del nivel de fertilización del suelo con nitrógeno y fósforo, sobre la tolerancia de los cultivos a las sales. Planteado de otra forma, se pretende evaluar la influencia de este efecto sobre el grado de salinización del suelo.

Uno de los puntos que se hace notar, a propósito de la evaluación de esta interacción, está relacionado con el hecho de que Maas y Hoffman (1977) indican que en la extensa investigación bibliográfica realizada por ellos, para el establecimiento del rendimiento relativo a diferentes condiciones de salinización del suelo cultivado, los experimentos fueron desarrollados con un nivel de fertilización correspondiente al nivel óptimo en suelos no salinizados, que puede incrementar o reducir la tolerancia de los cultivos a las sales y puede incluso actuar en forma diferente a cada nivel de salinización del suelo. Además, como no se requiere el empleo de la misma fórmula fertilizante con la cual se obtuvieron los datos presentados por Maas y Hoffman (1977), fórmulas diferentes podrán alterar de modo particular la tolerancia de los cultivos a las sales.

En tanto, para establecer la relación pretendida no se dispone de información

compatible. Maas y Hoffman (1977) Bernstein y otros (1974), Bernstein (1981) y Jurinak y Wagenet (1981) observan la existencia de contradicciones en la literatura disponible sobre el tema. Estos últimos autores atribuyen estas contradicciones a las diferentes fórmulas empleadas para la fertilización del suelo, las condiciones en que fueron desarrollados los experimentos, composiciones del nutriente y solución salina empleada para reproducir el nivel de salinización del suelo.

Es así que según Bernstein y otros (1974), el cultivo de maíz en primavera, en arenas fluviales de textura gruesa, salinizadas con una mezcla de NaCl y CaCl_2 , presenta fuerte reducción en su rendimiento cuando se aplican grandes cantidades de fósforo ($\text{K H}_2 \text{PO}_4$) soluble.

La aplicación de altas dosis de nitrógeno [$\text{Ca} (\text{NO}_3)_2$] tiene un efecto reducido sobre el rendimiento cuando se aplica en suelos salinizados. El suministro de bajas cantidades de este nutriente reduce fuertemente el rendimiento en todos los niveles de salinidad del suelo experimentados por los autores mencionados. Debido a la proporcionalidad en la reducción del rendimiento absoluto, comparado con los demás niveles de aplicación del nutriente, Bernstein y otros (1974) concluyen la independencia entre los efectos de la salinidad y de la cantidad de nitrógeno aplicado.

Con base en los datos presentados por Bernstein y otros (1974), se puede decir que para un mismo nivel de salinidad del suelo, el rendimiento relativo fue mayor con pequeñas aplicaciones de fósforo soluble, o para igual rendimiento relativo el nivel de salinidad correspondiente a este rendimiento es mayor cuando fueron aplicadas cantidades menores de este nutriente. Por lo tanto, la aplicación de grandes cantidades de fósforo en este caso, puede

ser comparado con el aumento del nivel de salinización del suelo que corresponde a la diferencia entre los dos niveles mencionados anteriormente (referido a la condición de aplicarse pequeñas cantidades de fósforo, por ejemplo). Si se dispusiera de suficiente información, y además consistente, este planteamiento podría ser empleado para evaluar el efecto de la fertilización sobre el nivel de salinización del suelo.

Bernstein y otros (1974) interpretan lo anterior e indican que fueron empleadas concentraciones de fósforo soluble demasiado altas, dañando al cultivo, y afirman que estas concentraciones casi nunca ocurren en los suelos agrícolas, aún con aplicaciones de grandes cantidades de fósforo, debido a la adsorción de fosfatos por el suelo y la reacción del fósforo soluble con los altos niveles de calcio disponible en los suelos salinizados.

Lunin y Gallatin (1965), que trabajaron con frijol en suelos de textura fina, salinizados con una mezcla de NaCl , MgCl_2 , CaSO_4 y K_2SO_4 concluyeron que la fertilización con nitrógeno (NH_4NO_3) y potasio (KCl) puede incrementar la CE_e , en tanto que el fósforo (H_3PO_4) puede reducir la CE_e , con una significancia estadística del uno por ciento para los dos primeros nutrientes y el cinco por ciento para el último. Según estos autores, los fertilizantes nitrogenados son por lo general solubles y por lo tanto tienen tendencia a incrementar la salinidad del suelo y los fosfatos tienden a formar compuestos insolubles al reaccionar con el calcio y el magnesio solubles, presentes en los suelos salinizados, y de esta manera reducen el nivel de salinización del suelo.

Según Khalil y colaboradores (Bernstein y otros (1974)), el efecto de la aplicación de fósforos en suelos salinizados, en cantidades superiores a la requerida para suelos no salinizados, puede no incrementar la tolerancia de los

cultivos a las sales, pero tiende a incrementar su rendimiento debido a que en los suelos salinizados existen restricciones al crecimiento de las raíces y a la absorción de fósforo. Sin embargo, tal efecto tendrá menor importancia si se trata de cultivos desarrollados en las arenas, donde hay continuo suministro de fósforo del suelo para las raíces.

Se puede decir de acuerdo con Lunin y Gallatin (1965), que el efecto de la fertilización con nitrógeno y fósforo puede ser sumado algebraicamente (uno reduciendo el efecto del otro), debido a que estos autores no encontraron, en el análisis de sus datos, significancia estadística de la interacción de la aplicación de estos nutrientes y el nivel de salinización del suelo.

Bernstein y otros (1974) consideran que cuando no hay problemas nutricionales específicos debidos a la salinidad del suelo, se puede fertilizar el suelo salinizado con las mismas recomendaciones que se hace para los suelos no salinizados, siempre que el nivel de salinidad no sea tan alto que impida la respuesta del cultivo debido a las restricciones en su crecimiento general o al crecimiento de las raíces. La conclusión de Maas y Hoffman (1977) sobre este aspecto, bajo la condición de que no haya problemas nutricionales específicos, es que la fertilización adicional a la recomendada para los suelos no salinizados, en los suelos salinizados tiene reducido efecto en el rendimiento o reduce la tolerancia de los cultivos a las sales, sin especificar la clase de nutrientes o el fertilizante aplicado.

En lo que se refiere al efecto de las diferentes fórmulas fertilizantes, se requiere de un amplio conocimiento del efecto de una determinada fórmula en los niveles de salinización de interés, en cualquier textura de suelo, para poder hacer uso del concepto de índice salino establecido por Rader y colabo-

radores, el cual es presentado por Jurinak y Wagenet (1981). Según los primeros autores, el índice salino porcentual en determinado fertilizante es la relación entre el incremento del potencial osmótico de la solución del suelo, debido a la aplicación de un determinado peso de fertilizante, y el correspondiente incremento debido a la aplicación de igual peso de nitrato de sodio, bajo idénticas condiciones. Es decir que una vez conocida la actuación de una fórmula determinada de fertilizante, según lo investigado por Rader y colaboradores, se puede conocer el efecto que tendrá cualquiera de las demás fórmulas presentadas en su tabla de índices salinos en su tabla.

Debido a la controversia que presenta la literatura sobre la interacción de la salinidad con el nivel de fertilización del suelo, se juzga que este punto no debe ser incluido en el modelo que se propone construir y de acuerdo con varias referencias discutidas en esta sección, se acepta que la fertilización en los suelos salinizados debe seguir las mismas recomendaciones que se hacen para los suelos no salinizados.

3.5 Eficiencia de la Fertilización con Nitrógeno, Bajo Diferentes Niveles de Humedad del Suelo.

Dado que el rendimiento máximo de un cultivo, para un determinado nivel de fertilización, se obtiene bajo la condición de que la humedad del suelo no limite su transpiración, el objetivo de la presente sección es conocer el efecto, sobre el rendimiento máximo, de la aplicación de la misma cantidad de fertilizantes a diferentes niveles de humedad del suelo.

Conviene aclarar que no se trata de establecer relaciones entre el rendimiento del cultivo, la cantidad total de agua que éste recibe en todo su ciclo y

el nivel de fertilización a que estará sometido, debido a que el rendimiento relativo se calcula a través de relaciones diarias entre la transpiración y la transpiración máxima del cultivo, en cada etapa de su desarrollo.

Así se puede replantear el objetivo mencionado como la búsqueda de una expresión matemática que representa la eficiencia de aplicación de determinada cantidad de fertilizantes, a diferentes regímenes de suministro de agua al cultivo.

En esta sección, a diferencia de la sección anterior, donde se ha analizado la interacción del fósforo y el nitrógeno con el nivel de salinización del suelo, únicamente se toma en cuenta la interacción entre el nivel de fertilización con nitrógeno y la humedad del suelo.

Este análisis está limitado al nitrógeno ya que Wagenet y otros (1980), al analizar la interacción del fósforo y el nitrógeno con el nivel de humedad del suelo, no encontraron significancia estadística en la interacción del primer fertilizante, pero se presentó una significancia en el análisis de la interacción con el nitrógeno (ambos al nivel de 5%).

Lo que hace suponer que esta interacción tiene una influencia limitada en el rendimiento del cultivo es el hecho de que Bauder y otros (1975) han analizado la interacción del nitrógeno con el nivel de humedad del suelo en dos localidades diferentes y observaron que apenas en una de ellas la mencionada interacción se mostró significativa. Sobre este aspecto, Viets (1967) encuentra que es más común que exista significatividad en esta interacción, confirmando de este modo la suposición anterior.

Con frecuencia en este tipo de análisis el nivel de humedad se asocia con el

número de riegos aplicados a lo largo del ciclo de cultivo (Musick y otros (1963), Bauder y otros (1975)), o con la frecuencia de riegos (Wagenet y otros (1980)), lo que limita las posibilidades de extrapolación de los resultados. Bauder y otros (1975) hicieron un esfuerzo en el sentido de poder extrapolar sus resultados, empleando, para la obtención del rendimiento relativo de materia seca de maíz, niveles relativos de fertilización con nitrógeno y número de riegos aplicados.

Estos autores no han obtenido significancia estadística (al nivel de 5%) para la extrapolación de los resultados derivados de las ecuaciones que representan el rendimiento relativo, al considerar dos localidades de los E.U.A., para dos diseños de experimentos (uno de ellos continuo), a pesar del procedimiento empleado proporcionar una variación de 0.72 a 1.05 cuando se emplean los máximos valores relativos de fertilización y número de riegos. Aún así, el procedimiento empleado no es factible de extrapolación debido a que se desconocen los niveles de nitrógeno existentes en el suelo (diferentes en cada localidad), los cuales no fueron considerados en las ecuaciones mencionadas.

Se reconocen las dificultades de análisis de resultados experimentales que podrían surgir de una propuesta que involucrara la interacción pretendida a nivel diario. Además, con la disponibilidad de información que se tiene en la actualidad, no se puede exigir un nivel de interacción que considere el período de análisis inferior a un ciclo de cultivo.

Para la periodicidad admitida, la información necesaria para establecer la relación requerida, para un determinado cultivo, y que sea extrapolable, es la cantidad de nitrógeno aplicada y disponible en el suelo, la política de riego empleada con sus correspondientes láminas aplicadas y la función de producción

que considere la interacción de los factores involucrados.

Las funciones de producción empleadas por Bauder y otros (1975) y Huszar y otros (1970), para representar la interacción de los factores involucrados, es del tipo polinomial cuadrática, la cual puede ser expresada a través de:

$$R = a_1 + a_2 W + a_3 N - a_4 W^2 - a_5 N^2 + a_6 W N \quad (9)$$

donde:

R es el rendimiento

W es la lámina de riego aplicada en el ciclo de cultivo,

N es la cantidad de nitrógeno aplicada al suelo y

$a_i, i = 1,6$ son coeficientes de la regresión, todos positivos.

Según Huszar y otros (1970), los signos de los coeficientes de esta regresión están de acuerdo con la teoría de las funciones de producción. En efecto, se puede esperar una reducción del rendimiento del cultivo a partir de determinada cantidad de agua que se le suministre (debido a la lixiviación de fertilizantes cuando no ocurren además problemas de aireación del suelo), o de un determinado nivel de disponibilidad de nitrógeno en el suelo, el cual se ha intentado correlacionar con el nivel y posible incremento de la salinidad del suelo, además de haberse investigado la posible correlación de este último factor con la evapotranspiración del cultivo (Carlson y otros (1959), Musick y otros (1963), Bauder y otros (1975)).

El experimento realizado por Huszar y otros (1970) fue seleccionado para establecer la interacción pretendida debido a que los datos presentados por estos autores satisfacen las necesidades mencionadas anteriormente. De la función

de producción por ellos establecida se puede derivar una ecuación que represente la eficiencia del nitrógeno disponible en el suelo, a diferentes láminas de riego aplicadas en todo el ciclo de cultivo, asociables a distintas políticas de riego. A continuación se describe brevemente este experimento.

Se aplicaron dosis de nitrógeno (sin especificar los autores el compuesto empleado), de 0, 56, 112, 168 y 224 kg/ha. Las láminas de riego aplicadas en todo el ciclo fueron aproximadamente 0, 70, 130, 150 y 225 mm, correspondientes a políticas de riego que implicara permitir que la humedad disponible en el suelo bajara hasta 5, 15, 30, 60 y 75% de la humedad aprovechable, esto es a 9.0, 6.0, 3.0, 1.0 y 0.7 bars de succión en el suelo. La humedad anterior a la siembra correspondió a la capacidad de campo y el suelo cultivado fue una arcilla limosa.

La precipitación en el período de cultivo (primavera de 1968), sumada a la lámina correspondiente de humedad aprovechable en los 60 cm. superficiales de suelo, disponible en el período de pre-plantío, corresponden aproximadamente a 190 mm. El nitrógeno disponible en los 90 cm superficiales de suelo (bajo la forma de NO_3^- y NH_4^+), corresponde a 234 kg/ha.

La función de producción obtenida por estos autores fue:

$$R = 5147.37756 + 24.30471 W + 13.82314 N - 0.05220W^2 + 0.00312 WN \quad (10)$$

donde

R es el rendimiento de granos de maíz en kg/ha

W es la lámina de riego aplicada en el ciclo

total del cultivo, en mm. y

N es la cantidad de nitrógeno aplicada, en Kg/ha.

con un coeficiente de determinación de aproximadamente 63% y según los autores mencionados, un alto nivel de significancia estadística determinado a través de la prueba de Fisher.

Esta función de producción está asociada con las condiciones locales bajo las cuales fue obtenida y a pesar de estar asociada con diferentes políticas de riego, no es extrapolable. De la derivada parcial del rendimiento con respecto al nitrógeno, se obtiene el rendimiento marginal de la enésima unidad de nitrógeno aplicado, para una determinada lámina de riego.

Este rendimiento marginal se expresa a través de:

$$\frac{\partial R}{\partial N} = 13.82314 - 0.08926 n + 0.00312 W \quad (11)$$

donde

$\frac{\partial R}{\partial N}$ es el rendimiento marginal debido a la aplicación de una unidad específica de nitrógeno,

n es el número de orden de la unidad de nitrógeno aplicado (con nitrógeno dado en kg/ha), y

W fue definido anteriormente.

La ecuación del rendimiento marginal debida a la aplicación de una unidad específica de nitrógeno, tal como la presentada, considera únicamente el nitrógeno que se aplica al suelo, sin considerar la cantidad disponible antes de su aplicación. Si se acepta que el rendimiento marginal debido al incremento

de una determinada unidad n obedece a la ecuación presentada desde el nivel cero de disponibilidad de este nutriente en el suelo, entonces, al considerar los 234 kg/ha de nitrógeno ya disponibles en el suelo, el rendimiento marginal debido a la disponibilidad de una unidad específica de nitrógeno estará dado por:

$$\frac{\partial R}{\partial N} = 34.70998 - 0.08926 n + 0.00312 W \quad (12)$$

Así, la eficiencia marginal de aplicación de nitrógeno (desde el nivel cero de disponibilidad del nutriente en el suelo), para una lámina de riego dada (EMAN), puede expresarse por:

$$EMAN = \frac{34.70998 - 0.08926 n + 0.00312 W}{34.70998 - 0.08926 n + 0.00312 W'} \quad (13)$$

donde W' es la lámina de riego, que se aplica en todo el ciclo de cultivo, para obtener el rendimiento máximo, en mm.

Finalmente, la eficiencia promedio de aplicación de X unidades de nitrógeno (desde el nivel cero), para una lámina de riego dada, EPAN, puede ser expresada por:

$$EPAN = \frac{\sum_{n=1}^X EMAN}{X} \quad (14)$$

Este valor de EPAN, multiplicado por el valor del rendimiento máximo que se puede obtener bajo determinado nivel de fertilización del suelo y sin haber limitaciones en las potencialidades de transpiración del cultivo debidas al nivel de humedad del suelo, proporciona el máximo rendimiento que se puede obtener al no mantener en el suelo el nivel de humedad requerido para la ob-

tención de la máxima eficiencia del nitrógeno aplicado. Más concretamente, EPAN puede ser visto como un coeficiente que divide el rendimiento relativo que se establece a través de las relaciones diarias entre la transpiración y la transpiración máxima del cultivo, en cada etapa de su desarrollo.

4. BALANCE Y REDISTRIBUCION DEL AGUA Y DE LAS SALES EN EL SUELO.

4.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es establecer la lámina de agua disponible y la lámina de concentración de las sales, en el suelo, en la profundidad correspondiente a la zona radicular de los cultivos sembrados (o a una profundidad igual cuando el suelo está en descanso), para determinar su transpiración y consecuentemente su rendimiento.

Para lograr lo anterior se puede recurrir por lo menos a dos diferentes planteamientos para establecer el balance y la redistribución del agua y de las sales.

sales en el suelo.

Con el primer planteamiento se puede solucionar, a través del empleo de métodos numéricos, las ecuaciones diferenciales parciales no lineales que representan el flujo del agua y el desplazamiento de las sales en el suelo. El segundo planteamiento representa de forma empírica estos flujos.

Al emplear los métodos numéricos la ecuación que representa el flujo de agua en el suelo puede ser definida a través de la consideración de la continuidad o balance de masa, empleando para esto la ecuación de Darcy y puede ser representada en términos de la difusividad y/o la conductividad hidráulica (Smiles (1977), Eagleson (1978)). Según estos autores el flujo de agua unidimensional (vertical), en suelos no cultivados, homogéneos, puede ser representado por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (15)$$

donde θ es el contenido volumétrico de humedad (en cm^3 de humedad del suelo por cm^3 de volumen total), z es la coordenada vertical, medida a partir de la superficie, positiva hacia abajo, t es el tiempo, $K(\theta)$ es la conductividad hidráulica en cm/s y $\psi(\theta)$ es el potencial matricial del suelo, en cm .

La difusividad, en cm^2/s , para el caso de no histeresis, suelo uniforme y que $\psi(\theta)$ sea único, idéntico tanto para situaciones estáticas como dinámicas (Smiles (1977)), puede ser definida a través de:

$$D(\theta) = K(\theta) \partial \psi(\theta) / \partial \theta \quad (16)$$

lo que hace que la ecuación (15) pueda ser expresada a través de:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (17)$$

Según Smiles (1977), el primer término del segundo miembro de la ecuación (17) representa el flujo debido al gradiente del potencial de humedad, en cuanto que el segundo término representa la contribución gravitacional. Cuando se trata de suelos cultivados, al segundo miembro de esta ecuación se le restará un término relativo a la extracción radicular.

Según Bresler (1981), el desplazamiento de las sales a través de la difusión puede ser representado por la primera ley de Fick, empleándose una aproximación a esta ley para representar el transporte de las sales por convección. El flujo conjunto de sales debido a la difusión y la convección, según este autor, puede ser representado a través de:

$$J = -D(V, \theta) \frac{\partial C}{\partial z} + qC \quad (18)$$

donde J es el flujo total de sales en $\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}$, C es la concentración de sales de la solución del suelo en g/cm^3 , Z es la coordenada de la dirección del flujo, D es un coeficiente combinado de dispersión difusión, en cm^2/s , que depende de la velocidad promedio del flujo V y del contenido volumétrico de humedad del suelo, θ , y q es el flujo volumétrico específico de sales, en $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$.

Para condiciones transitorias, el flujo unidimensional puede ser derivado de la ecuación (18) a través de planteamientos de continuidad o conservación de la masa. Según el autor mencionado este flujo puede ser expresado por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (Q + \theta C) = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(V, \theta) \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \frac{\partial (qC)}{\partial z} + S' \quad (19)$$

donde

Q es la concentración local (positiva o negativa) de sales acumuladas en meq/cm³ de suelo y

S' es cualquier fuente de entrada o salida del sistema (producción, precipitación, disolución o absorción por cultivos).

Este planteamiento ha sido empleado en otros modelos de esta naturaleza (Nimah y Hanks (1973 a,b), Childs y Hanks (1975), Childs y otros (1977), Tscheschenke y Gilley (1979), Gilley y otros (1980)), con frecuentes logros considerados aceptables por los que lo han empleado. Según Hanks y Hill (1980), Wolf al evaluar en 1977 el modelo empleado por Nimah y Hanks (1973 a, b) y Childs y Hanks (1975), obtuvo excelentes concordancias entre los valores medidos y los simulados siempre y cuando la salinidad del suelo se mantuviera en valores "bajos". Para valores "altos" de salinidad este modelo, en la evaluación de Wolf, ha presentado mayores rendimientos simulados que los observados.

Con respecto a este primer planteamiento para determinar las concentraciones salinas y contenidos de agua en el perfil del suelo, Bresler (1981) indica que el trabajo de campo realizado por Warrick y otros (1971) es bueno para comparar los resultados calculados, a través de soluciones simplificadas a las ecuaciones diferenciales parciales mencionadas anteriormente, con los obtenidos experimentalmente. Una importante simplificación asumida por estos autores fue considerar constante el coeficiente combinado de dispersión-difusión de las sales.

Los valores calculados, según Bresler (1981), presentaron una pequeña discrepancia con respecto a los experimentales, además de Warrick y otros (1971) indican que el experimento les permitió señalar que el flujo de las sales es prácticamen-

ticamente independiente del contenido inicial de humedad del suelo. Sin embargo, a través de experimentos realizados en macetas, Dahiya y otros (1980) han concluido que existe una influencia apreciable, del contenido inicial de humedad del suelo, en el desplazamiento de las sales. Además, no han encontrado concordancia satisfactoria entre la profundidad de la máxima concentración salina, calculada con la solución aproximada propuesta por Warrick y otros (1971), y aquella medida en forma experimental, donde las sales han sido aplicadas superficialmente, disueltas en agua infiltrable, obteniéndose los peores resultados en arenas y suelos franco arenosos.

En el planteamiento de solucionar numéricamente las ecuaciones de flujo de agua y sales, la primera de éstas requiere conocer el término de extracción radicular cuando se trata de suelos cultivados.

El trabajo de Molz (1981) es una importante evaluación del estado actual del conocimiento con respecto a este término y presenta un gran número de expresiones para su representación, lo que indica la diversidad de planteamientos que existen para su determinación.

La evaluación propuesta por Parkes y O'Callaghan (1980), para representar el término de extracción radicular, indica que la solución numérica de la ecuación que representa el flujo del agua, en los suelos cultivados, proporciona predicciones imprecisas del valor de la lámina de agua acumulada en el suelo, debido a la dificultad en describir adecuadamente la evapotranspiración.

Parkes y O'Callaghan (1980) afirman que los modelos empíricos son imprecisos para realizar tales evaluaciones pero, sin embargo, requieren de cantidades considerablemente menores tanto de datos, como de tiempo de computadora.

Greacen (1977) excluye a los modelos físicos para el uso agrícola, por su costo y uso

plejidad, no obstante afirma que últimamente se vienen realizando esfuerzos para incorporar en los modelos más sencillos los avances con respecto a la representación de la realidad física.

Con respecto al desplazamiento de las sales en el suelo, Bresler (1981) indica que debido a las dificultades para obtener todos los parámetros necesarios para la estimación de las relaciones físicas entre suelo-planta-agua-sales, puede ser de utilidad práctica un procedimiento simplificado para la estimación de este desplazamiento.

Por la necesidad de simplificar la naturaleza de los datos requeridos para la determinación del balance y la redistribución del agua y las sales en el suelo, se propone, como segundo planteamiento, el empleo de un modelo empírico que pueda incorporar aspectos de la representación física de estos flujos. En la próxima sección se hace la descripción general del modelo, seguida de la descripción de sus partes constituyentes

4.2 Modelo Empírico

4.2.1 Balance del Agua

La ecuación que representa el balance del agua en la capa más superficial del suelo puede ser expresada a través de:

$$L_i = L_{i-1} + LR_i + LI_i - E_i - T_i + R_i \quad (20)$$

donde los índices se refieren al término del día considerado y las literales representan respectivamente las láminas:

- L_i disponible para el cultivo,
- LR_i bruta de riego aplicada sobre el área de interés,
- LI_i infiltrable de una dada precipitación,
- E_i correspondiente a la evaporación del agua del suelo,
- T_i correspondiente a la transpiración del cultivo y
- R_i redistribución entre las capas.

La secuencia de operaciones para el balance se inicia restando la evaporación a la lámina de agua disponible en la primera capa, seguida del cálculo de la lámina de transpiración del cultivo en función de la lámina de agua disponible en las capas donde hay raíces, empleándose para esto el procedimiento descrito en la Subrutina "Transp" en el anexo II.

Se continua con la suma de las cantidades correspondientes a la lámina de riego y/o infiltrable, si es que las hay, posteriormente se suma o resta la lámina correspondiente a la redistribución.

El valor mínimo de la lámina L_i es negativo y no puede ser inferior a la diferencia entre la lámina almacenable en el punto de marchitamiento permanente y la lámina de agua que contiene la capa de suelo cuando se le seca en presencia de la humedad atmosférica. Es evidente que este aspecto está relacionado exclusivamente con la capa superficial del suelo.

La evaporación extrae humedad de la capa superficial y no influye en el balance del agua correspondiente a las demás capas, donde la entrada por concepto de riego o lluvia es igual a lo que entra en la capa precedente menos la deficiencia que esta capa tenga con respecto a la humedad correspondiente a su capacidad

pacidad de campo.

Tal como se presenta, este planteamiento tiene implícito una redistribución interna inmediata, cuyas implicaciones pueden ser consideradas despreciables en virtud de no alterar la lámina evaporada del suelo (que será la máxima); tampoco se afecta la lámina transpirada por el cultivo ya que de acuerdo al párrafo concerniente a la transpiración, en el caso de haber una lámina excedente a la deficiencia con respecto a la capacidad de campo de la primera capa y haber percolación a las siguientes, la lámina de transpiración del cultivo se será extraída de esta primera, cuyo contenido de humedad es alto. Lo que podría estar alterado es la profundidad alcanzada por el frente de avance de la humedad a las siguientes capas, efecto que se amortigua en un período no mayor que aquel requerido para que la humedad de las capas superiores baje hasta la capacidad de campo, esto es, aproximadamente 24 a 48 horas para la mayoría de los suelos.

Si la entrada de agua referente a una determinada capa no es suficiente para elevar hasta la capacidad de campo cualquiera de las capas consideradas, no habrá percolación a la siguiente.

El agua para la transpiración sólo puede ser extraída de las capas donde hay extraída raíces y la que contiene la mayor cantidad de agua disponible, con prioridad a la más próxima a la superficie cuando en iguales condiciones, contribuye con la mayor parte (o la totalidad) de la lámina requerida para la transpiración (máxima) del cultivo. Si no se extrae toda la lámina requerida de una sola vez, se repite una vez más el procedimiento mencionado, donde la nueva transpiración máxima es igual a la anterior menos la cantidad extraída en la primera vuelta.

La lámina infiltrable se calcula en función de la condición del terreno y de la lluvia antecedente, de acuerdo al procedimiento establecido por el Servicio de Conservación de Suelos de los E.U.A., que se describe en la sección 4.2.3.

La redistribución se calcula a través de la ecuación de Darcy y el objetivo fundamental de su inclusión es considerar los desplazamientos largos de humedad que se verifican, en función de las altas tensiones originadas a nivel de la superficie, en las zonas áridas y semi-áridas. Aunque no hay distribución uniforme de las sales en el perfil del suelo, se considera únicamente los gradientes hidráulicos para el cálculo de esta redistribución.

Otro motivo para la inclusión de la redistribución de la humedad está asociado con la posible proximidad del nivel freático a la zona radicular de los cultivos, o la presencia de una capa impermeable a pequeñas profundidades que, por sus características, permita la acumulación periódica de agua que pueda contribuir para la evaporación y transpiración del cultivo.

Conviene aclarar que el modelo no realiza el balance de agua a nivel de cuenca, ni tampoco se propone simular la posible fluctuación del nivel freático,

cuya existencia y oscilación deberá ser suministrada al modelo bajo la forma de dato de entrada.

En cuanto al balance y redistribución de sales, se efectúan de acuerdo a modificaciones impuestas al modelo de Bresler (1967), el cual ha presentado resultados satisfactorios en varias oportunidades (véase p. ej. a Yaron y otros (1972), Bresler e Yaron (1972), Yaron y otros (1980)).

El balance de sales se hace con base en la conservación de la masa y se reali

za bajo suposiciones que se presentan más adelante. A nivel general, se puede decir que primero se considera la entrada y la redistribución debidas a la infiltración y percolación de la precipitación o del riego, para posteriormente sumar o restar las cantidades de sales que fluyen conjuntamente con la masa líquida redistribuida de acuerdo a la ecuación de Darcy.

4.2.2 Balance de Sales en el Suelo

Para representar el flujo descendiente de las sales en el perfil del suelo, a causa de riegos o lluvias, se puede emplear el modelo de Bresler (1967). Este modelo, cuando no se considera la precipitación de las sales, su absorción por los cultivos o la adsorción por el suelo, establece que la cantidad de sales adicionada a una determinada capa de suelo, menos la cantidad lixiviada a la siguiente capa de suelo, es igual a la variación del contenido de sales en esta capa. Matemáticamente este modelo puede ser expresado a través de:

$$V \cdot C - V_D \cdot C_D = (C_1 - C_0) \cdot \theta \cdot \Delta X \quad (21)$$

donde

V es la lámina de riego aplicable o infiltrable de lluvia, en mm;

C es la concentración del agua de riego, en meq/litro;

V_D es la lámina lixiviada para la siguiente capa de suelo, en mm;

C_D es la concentración del agua lixiviada en meq/litro;

C_1 es la concentración promedio de sales, disueltas en el agua del suelo, referida al nivel de humedad θ , después de una

lluvia o riego, en meq/litro;

C_0 es igual a C_1 , pero antes de la lluvia o riego.

θ es el contenido (único) de humedad del suelo para el cual se admite que hay flujo de agua y sales, en cm^3/cm^3 y

ΔX es el espesor de la capa de suelo considerada, en mm

El procedimiento anterior, en su concepción original, se refiere al agua de irrigación cuya concentración salina es igual a C . Este mismo procedimiento puede ser extendido para el caso de lluvias considerándose, a excepción de áreas específicas sujetas a fuerte contaminación atmosférica, que su concentración salina es cero.

Según Bresler (1967), las hipótesis en las cuales se apoya el presente modelo son:

- a) El movimiento de las sales ocurre conjuntamente con la masa de agua y es exclusivamente descendiente. Además, ocurre en el nivel de humedad anteriormente definido como θ , al cual se refieren todas las concentraciones, y termina cuando el suelo alcanza la capacidad de campo.

La redistribución del agua y las sales ocurre bajo hipótesis diferentes y se presentan en la sección 4.2.4.

- b) En una cierta capa de suelo la lámina drenada a la siguiente capa será todo el excedente al déficit de humedad de la capa considerada, con respecto a la capacidad de campo; y

- c) La concentración promedio del agua lixiviada de cualquier capa de suelo considerada, C_D , es igual a la media aritmética de las concentraciones antes y después del riego, esto es, $C_D = (C_1 + C_0)/2$, siempre y cuando la lámina lixiviada V_D sea menor o igual a $(2 * \theta * \Delta x)$. Cuando V_D es mayor que este valor, la concentración del excedente lixiviado (con respecto al valor de $(2 * \theta * \Delta x)$) será igual a C_1 .

Bajo las suposiciones anteriores y en ausencia de precipitación, adsorción de iones en el suelo y absorción de iones por los cultivos, la ecuación anterior se puede expresar a través de:

$$V * C - (V - E) * \left[\frac{C_0 + C_1}{2} \right] = (C_1 - C_0) * V' \quad (22)$$

donde

E es el déficit de humedad, hasta la capacidad de campo, en mm,

y

V' representa a $(\theta * \Delta x)$.

La ecuación (22) es válida para $(V - E) \leq 2 * V'$ y para $(V - E) > 2 * V'$ se transforma en:

$$V * C - 2 * V' * \left[\frac{C_0 + C_1}{2} \right] - (V - E - 2 * V') * C_1 = (C_1 - C_0) * V' \quad (23)$$

o sea

$$C_1 = \frac{V * C}{V - E} \quad (24)$$

Para la situación en que V es menor que E se asume que $(V - E)$ es igual a cero.

De acuerdo a Bresler (1967), cuando V_D excede a dos veces el volumen de poros de la capa del suelo considerada ($(2 * \theta * \Delta x)$ si θ representa la humedad correspondiente a la saturación), la concentración de sales en esta capa será igual a la concentración del agua de riego.

Según la ecuación anterior esto podría ocurrir únicamente si E es igual a cero, porque el suelo está a su capacidad de campo y para que haya un nuevo humedecimiento tendría que llover "inesperadamente" después de un riego, o se lleva a cabo un lavado del suelo. Por lo tanto, a excepción de las circunstancias mencionadas anteriormente, el valor de C_1 , siempre que E sea mayor que cero, es mayor que C .

La humedad ya mencionada (θ) puede ser, según Bresler (1967), una posible fuente de error en la calibración del modelo de balance de sales en el perfil del suelo.

Al probar valores de θ iguales a 1.5 ó 2 multiplicados por la humedad correspondiente a la capacidad de campo (la segunda alternativa representa aproximadamente la saturación), Bresler (1967) obtuvo desviaciones puntuales con respecto a la salinidad observada, provocada por cloruros, de hasta 22% (para $\theta = 2$ veces la humedad en la capacidad de campo) y 20% (para $\theta = 1.5$ veces esta humedad). Las desviaciones con respecto al promedio fueron muy inferiores, sin rebasar un 6% en ambos casos.

Aún con desviaciones puntuales superiores a las observadas cuando se ha considerado $\theta = 1.5$ veces el contenido de humedad correspondiente a la capacidad de campo, debido a la justificación que se presenta a continuación se emplea, en el presente modelo, un valor de θ correspondiente a dos veces este contenido.

nido de humedad, o sea, aproximadamente la saturación.

De acuerdo a Smiles (1977), Childs y Bybordi al examinar la infiltración en suelos estratificados han considerado la conductividad hidráulica igual a cero para cualquier θ , excepto en la saturación, cuando se considera constante diferente de cero. Esta concepción de la conductividad se debe a Green y Ampt, fue desarrollada en 1911 para evaluar la infiltración y según Freyberg y otros (1980), ha sido empleada y considerada útil y satisfactoria en un número apreciable de problemas de esta naturaleza.

El modelo propuesto por Bresler (1967) fue calibrado en tres tipos de suelos (arcillas, limos y arenas), siempre a bajas concentraciones salinas (inferiores a 20 meq/litro en la solución del suelo) y fue considerada una herramienta satisfactoria para los propósitos de estimar y predecir aproximadamente la acumulación y lixiviación de los cloruros, bajo condiciones de campo, conclusión compartida con otros investigadores, como ya se mencionó.

4.2.3 Infiltración.

En esta sección se considera la infiltración según el modelo simplificado del Servicio de Conservación de Suelos de los E.U.A.

Este modelo tiene como ventaja sobre otros modelos empíricos, como el de Horton, de requerir el conocimiento del total precipitado diariamente y el uso y textura del suelo, esto último con objeto de asociarlo con la permeabilidad, sin requerir, por lo tanto, de mediciones locales. Este modelo fue empleado por Sánchez B. y otros (1980), de donde provienen los cuadros que se presentan a continuación.

Según el modelo, la lámina infiltrada, en cm, puede ser obtenida a través de:

$$LI = P - Q \quad (25)$$

donde

P es la precipitación diaria

Q es el escurrimiento superficial y

LI es la lámina infiltrable, todos en cm.

El escurrimiento superficial se obtiene en función del total diario de precipitación P y del valor de N, el cual, según Ortega Gil y otros (1974), es un factor de escurrimiento que depende de la cubierta del suelo, la práctica (de cultivo y protección) o tratamiento, la condición hidrológica y el grupo hidrológico del suelo. Los valores de N, en función de estos parámetros, son presentados en el cuadro 1.

El cuadro 2 se refiere a la condición de la lluvia del día anterior al que se simula. Si en este día ocurre una precipitación entre 2.54 y 5.08 cm, el valor de N es el que se obtiene a través del cuadro 1. En tanto, si la precipitación en el día anterior fue mayor que 5.08 cm (condición III), o menor que 2.54 cm (condición I), entonces el valor de N deberá ser multiplicado por los respectivos factores que se encuentran en este cuadro.

Una vez que se conoce el valor de N y el total de la precipitación diaria, se puede determinar el escurrimiento a través de:

$$Q = \frac{(P - I_a * S)^2}{P + (1 - I_a) * S} \quad (26)$$

donde S se obtiene a través de:

$$S = \left[\frac{1000}{N} - 10 \right] * 2.54, \quad (27)$$

con S y Q dados en cm.

Según Aron y otros (1977) el valor de S en las ecuaciones (26) y (27) representa la máxima acumulación potencial de agua en el suelo y el coeficiente multiplicador de S en la ecuación (26), I_a , representa la detención superficial y acumulación en depresiones. El valor asignado a I_a para derivar los cuadros 1 y 2 fue igual a $0.2 * S$.

4.2.4 Redistribución del Agua y de las Sales

Los límites de la frontera superior fueron implícitamente definidos en la medida en que se ha presentado un balance de agua que representa su flujo a través de la superficie del suelo y del cultivo (infiltración, evaporación y transpiración). Por lo tanto, queda pendiente la caracterización de los flujos a través de la frontera inferior y la redistribución interna del agua y las sales en el perfil del suelo.

Según Feddes y otros (1978) las condiciones de frontera en el campo pueden ser representadas por cuatro tipos diferentes de perfiles de suelo, de acuerdo a las condiciones en su plantilla:

- a) Infinito, esto es, de drenaje libre.
- b) Finito, con una capa impermeable que representa el límite inferior.
- c) Finito, con el límite inferior representado por un nivel freático estático.
- d) Como en c pero con el nivel freático fluctuante.

CUADRO 1

NUMERO DE ESCURRIMIENTOS N PARA MULTIPLES CUBIERTAS HIDROLOGICAS
DEL SUELO (PARA LLUVIAS PRECEDENTES CORRESPONDIENTES A LA CONDICION

$$II \text{ y } I_a = 0.2 * S)$$

Uso del suelo o cubierta	Tratamiento o Práctica	Condición Hidrológica	*Grupo de Suelo Hidrológico			
			A	B	C	D
Barbechado Siembra en Hilera	Hilera recta	-	77	86	91	94
	Hilera recta	Pobre	72	81	88	91
	Hilera recta	Buena	67	78	85	89
	Contorno	Pobre	70	79	84	88
	Contorno	Buena	65	75	82	86
	Terraza	Pobre	66	74	80	82
	Terraza	Buena	62	71	78	81
Grano pequeño	Hilera recta	Pobre	65	76	84	88
	Hilera recta	Buena	63	75	83	87
	Contorno	Pobre	63	74	82	85
	Contorno	Buena	61	73	81	84
	Terraza	Pobre	61	72	79	82
	Terraza	Buena	59	70	78	81
Semilla cerrada legumbres o pra- deras de rota- ción	Hilera recta	Pobre	66	77	85	87
	Hilera recta	Buena	58	72	81	85
	Contorno	Pobre	64	75	83	85
	Contorno	Buena	55	69	78	83
	Terraza	Pobre	63	73	80	83
	Terraza	Buena	51	67	76	80
Gran extensión de terreno con pasto	Hilera recta	Pobre	68	79	86	89
	Hilera recta	Mediana	49	69	79	84
	Contorno	Buena	39	61	74	50
	Contorno	Pobre	47	67	81	88

(Continúa Cuadro 1)

Uso del Suelo o Cubierta	Tratamiento o práctica	Condición Hidrológica	Grupo de Suelos Hidrológicos			
			A	B	C	D
Pradera (permanente)		Buena	30	58	71	78
Bosques (porción de bosques de granja)		Pobre	45	66	73	83
		Mediana	36	60	73	78
		Buena	25	55	70	77
Granjas			59	74	82	86
Carreteras y derecho de camino (superficie dura)			74	84	90	92

Complemento al Cuadro 1.

- | * Grupo de Suelo | Descripción. |
|------------------|--|
| A. | El más bajo potencial de escurrimiento. Incluye capas gruesas de arena con poco aluvión y arcilla; también en capas gruesas, loess rápidamente permeables. |
| B. | Moderadamente bajo potencial de escurrimiento. Casi la mayoría de suelos arenosos con menores espesores que los del grupo A, y loess con espesores menores o menos agregados que A, pero el grupo en sí tiene un sobreporcentaje de infiltración después de acabado el <u>h</u> umedecimiento. |
| C. | Moderadamente alto potencial de escurrimiento. Comprende suelos de espesores bajos y suelos que tienen una cantidad considerable de arcilla y coloides, pero menos que el grupo D. El grupo tiene un bajo porcentaje de infiltración después de la precipitación. |
| D. | El más alto potencial de escurrimiento. Incluye la mayoría de las arcillas de alto porcentaje de expandibilidad, pero el grupo también incluye algunos suelos de espesores bajos con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie. |

CUADRO 2

CONDICIONES DE LLUVIA ANTECEDENTE, NUMEROS DE ESCURRIMIENTO N
(PARA $I_a = 0.2 * S$)

N PARA CONDICION II	FACTOR PARA CONVERTIR EL NUMERO DE ESCURRIMIENTO N PARA CONDICION II	
	CONDICION I	CONDICION III
10	0.40	2.22
20	0.45	1.85
30	0.50	1.67
40	0.55	1.50
50	0.62	1.40
60	0.67	1.30
70	0.73	1.24
80	0.79	1.14
90	0.87	1.07
100	1.00	1.00

La condición b puede representar la condición de la frontera inferior de un lisímetro.

Los tipos c y d consideran como frontera inferior al nivel freático debido a que su contribución de agua a la zona radicular puede ser considerable, cuando este se encuentra a pequeñas profundidades (Follet y otros (1974), Stuff y Dale (1978)), y esta contribución puede ocasionar resultados no satisfactorios en modelos como el que se presenta.

A continuación se mencionan dos procedimientos empíricos para evaluar la contribución a través de la frontera inferior.

Para Stuff y Dale (1978) el flujo capilar ascendente puede ser estimado a través de:

$$C = 0.084 * D * G^{-3.8} \quad (28)$$

donde:

- C es el flujo capilar en mm/día
- D es el déficit de humedad en la zona radicular, en un determinado día, en mm.y
- G es la profundidad del nivel freático, con respecto a la superficie, en m.

Este planteamiento para determinar el flujo capilar ascendente puede adecuarse a las necesidades de modelos agrícolas, en zonas húmedas o sub-húmedas y así incluir el efecto que ejerce el nivel freático sobre el balance de agua en la zona radicular.

Sin embargo, cuando los autores mencionados emplean como variable independien

te el déficit de humedad en la zona radicular; limitan el campo de aplicación del modelo en la medida en que determinado déficit en el suelo analizado (franco limoso), representa un nivel de tensión de succión en este suelo que no corresponde a las tensiones que se presentan en suelos de textura diferente a la investigada.

El otro planteamiento, empleado por Burt y otros (1981), se debe a Doorenbos y Pruitt (1977) que consideran la tasa de flujo ascendente función de tres factores: la profundidad del nivel freático, el contenido del agua en la zona radicular y las propiedades capilares del suelo. Estos autores presentan una gráfica que permite determinar esta tasa para diferentes texturas del suelo, bajo la suposición de que la zona radicular se encuentra "relativamente húmeda".

Los planteamientos mencionados, con reserva respecto a su generalización, pueden ser útiles en modelos de la naturaleza del que aquí se plantea, si su aplicabilidad estuviera limitada a las zonas húmedas o sub-húmedas. Sin embargo, si estos planteamientos permiten considerar el flujo ascendente, no contribuyen para la determinación de la redistribución interna de los contenidos de humedad de cada una de las capas del suelo (debido a que no consideran esta subdivisión de la zona radicular), por ejemplo en zonas donde no se registren niveles freáticos someros.

Debido a lo anterior y considerando que el empleo de la ecuación de Darcy requiere, además de los datos que ya se manejan en el modelo, únicamente el conocimiento de la conductividad hidráulica del suelo, se juzga conveniente su adopción. El propio conocimiento de la conductividad hidráulica puede ser establecido a nivel de un valor representativo, tanto de la textura

como del contenido de humedad en el que se encontrará con mayor frecuencia el perfil del suelo que será simulado.

A un nivel más preciso y suponiendo que se dispone de la relación entre la conductividad hidráulica y el contenido de humedad, esta conductividad, a semejanza de lo admitido por Greacen (1977) para la difusividad, puede ser considerada como el valor promedio de las conductividades, referidas a los respectivos contenidos de humedad, de cada una de las capas involucradas en el proceso de redistribución.

La ecuación de Darcy establece que:

$$q = K(\theta) * \frac{\Delta(TS)}{\Delta X} \quad (29)$$

donde

q es el flujo vertical de redistribución, en cm/día, de una capa a otra,

ΔX es la distancia en cm entre centros de gravedad de dos capas vecinas

$K(\theta)$ es la conductividad hidráulica, en cm/día, dependiente del contenido de humedad de la capa, o su valor representativo y

$\Delta(TS)$ es la diferencia de la suma de la tensión de succión del suelo y la carga correspondiente a la gravedad, de una y otra capa, en cm.

En cuanto a las condiciones de la frontera inferior cuando se emplea esta ecuación, las cuatro posibilidades mencionadas anteriormente podrán ser representadas, de acuerdo a los datos suministrados al modelo.

Es así que en el caso del perfil infinito el balance y la redistribución del agua y las sales pueden ser confinados a la zona radicular, ignorándose lo que sucede abajo de esta y se asume, por lo tanto, una percolación profunda sin posibilidad de regreso a la zona radicular.

Se admite que cuando existe una capa impermeable pueden ocurrir dos situaciones: en la primera la topografía del subsuelo y las propiedades del suelo permiten una rápida eliminación del excedente de lluvia o riego y se trata como si fuera un perfil infinito; en la segunda, puede haber acumulación en depresiones localizadas en la capa impermeable, en algún período del año, lo que hace que el comportamiento del subsuelo y la frontera inferior del perfil de simulación, en el período mencionado, se considere sujeto a las fluctuaciones de un nivel freático, cuya oscilación deberá ser suministrada bajo la forma de dato de entrada al modelo.

En ambos casos la profundidad radicular no podrá exceder a la profundidad simulada, cuyo límite es la capa impermeable o el nivel freático.

Cuando existe un nivel freático y su proximidad es tal que puede contribuir para el balance de agua y sales en la zona radicular, la simulación deberá realizarse hasta este nivel, que representa la frontera inferior, designándose el valor cero para la tensión de succión de la capa freática ubicada abajo de la profundidad simulada.

En lo referente a la redistribución de las sales, se admite que ésta ocurre conjuntamente con la lámina de agua a ser redistribuida y su concentración se refiere al estado de humedad real de la capa de donde se extrae esta lámina. Lo mismo se aplica cuando la lámina de redistribución proviene del ni-

vel freático, cuya concentración es dato de entrada del modelo.

La capa que recibe la lámina de redistribución tendrá su lámina de agua disponible incrementada en un valor igual a la lámina recibida. El cambio en su concentración salina, tanto real como la referida a la saturación, se determina a través de un balance de masa, el cual puede ser expresado a través de:

$$C_1^* = (C_1 * V + CF * R)/V \quad (30)$$

donde

C_1^* es la concentración, en meq/litro, relativa a la saturación de la capa considerada y después de recibir la lámina de redistribución R,

R es la lámina de redistribución en cm,

CF es la concentración de sales de la lámina de redistribución, en meq/litro,

V es la lámina de agua almacenable (hasta la saturación, en cm) en la capa considerada y

C_1 es igual a C_1^* , pero antes de recibir la lámina R.

Para la capa que cede la lámina de redistribución la señal positiva de la ecuación (30) se cambia en negativa y C_1^* es la concentración, en meq/litro, relativa a la saturación de la capa considerada, después de ceder esta lámina.

5. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO.

Para la calibración del modelo se emplearon dos conjuntos de datos, provenientes de los experimentos realizados en el campo por personal de la SARH, en el Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego (CENAMAR), el primero, y en el Distrito de Riego 003-TULA, el segundo.

5.1 Experimento Realizado en el CENAMAR

El CENAMAR se encuentra al margen derecho del canal principal Sacramento del Distrito de Riego 017 en la Región Lagunera, la cual se ubica en la parte suroeste del estado de Coahuila y noroeste del estado de Durango, comprendida

entre los paralelos $24^{\circ} 30'$ y $27^{\circ} 00'$ de latitud norte y entre los meridianos $102^{\circ} 00'$ y $104^{\circ} 40'$ de longitud oeste. Su clima se clasifica (SARH (1978), Moreno Rubio (SD)), de acuerdo a Thornthwaite, como Edb'a, provincia de humedad E árida con vegetación desértica y humedad deficiente en todas las estaciones, de temperatura B', mesotérmica, subprovincia de temperatura a con una concentración entre 25 y 34% en el verano.

Este experimento se llevó a cabo en el verano de 1981 y el cultivo investigado fue el maíz, variedad H-412. Los objetivos fueron encontrar la función de producción del uso de agua por el cultivo, así como un programa óptimo de riegos. Para la definición del rendimiento en granos se empleó como variable independiente el número de riegos aplicados antes y después de la floración.

El experimento fue realizado en suelo de textura migajón arcilloso, permeable, con buen drenaje natural, poca tendencia al agrietamiento, sin problema de sales y sin estar el área sujeta a la influencia de niveles freáticos someros. En el cuadro 3 se describen algunas de las características físico-químicas del suelo, relevantes para la operación del modelo. Los porcentajes de humedad están referidos al peso del suelo seco.

En cuanto a la fertilidad, se desconoce la historia del uso anterior del suelo experimental, aunque en el reporte se afirma que se trata de suelo con fertilidad media por su contenido de nitrógeno y fósforo. La aplicación de estos nutrientes en el ciclo de cultivo considerado fue de 120 y 40 kg/ha, respectivamente.

El agua utilizada para regar el experimento provino de un pozo profundo del campo experimental del CENAMAR, se clasifica como C_3S_1 , con una conductividad



C U A D R O 3
CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS DEL SUELO
EXPERIMENTO CENAMAR

Profundidad (cm)	Capacidad de campo (%)	Punto de Marchita miento permanente	Densidad aparente g/cm ³	Conductividad Eléctrica del Extracto de Saturación del suelo mmhos/cm a 25°C
0 - 30	31.56	16.44	1.30	2.0
30 - 60	28.10	15.21	1.26	1.6
60 - 90	26.90	14.67	1.20	1.2

eléctrica de 850 micromhos/cm a 25°C y se considera de segunda clase.

La siembra se realizó el 11 de junio y la cosecha el 15 de octubre, con un ciclo de cultivo de 127 días.

La programación de los riegos se determinó de acuerdo a los valores pre-establecidos de evaporación acumulada en un tanque clase A. La aplicación de las láminas de riego se realizó a través de sifones, en surcos, hasta llevar a la capacidad de campo un perfil de 90 cm de suelo.

De acuerdo a lo anterior y según diseño experimental de bloques al azar con 4 repeticiones y arreglo de tratamiento en cuadrado doble, con la posibilidad de 1 a 5 riegos en la etapa de pre-floración y 0 a 4 riegos en la etapa de post-floración, se presenta el cuadro 4, con la programación de los riegos para los trece tratamientos resultantes, donde el primer riego se aplicó en el día de la siembra.

Como resultado del experimento se presenta el cuadro 5 con los rendimientos en granos para cada uno de los tratamientos considerados, con todas las repeticiones y el promedio del rendimiento cosechado.

Por último, la función de producción determinada se expresa por:

$$Y = 3.6728771 + .20867126R_1 + .22943216 R_1 R_2 ,$$

donde:

y es el rendimiento de granos en Ton/ha,

R₁ es el número de riegos en la primera etapa y

R₂ es el número de riegos en la segunda etapa,

con un coeficiente de determinación de 46 por ciento.

CUADRO 4

INTERVALO ENTRE RIEGOS, EN DIAS

EXPERIMENTO CENAMAR

TRATAMIENTO	RIEGOS*		NUMERO DE RIEGO									
	AF	DF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	- 0	0									
2	1	- 2	0	53	22							
3	1	- 4	0	53	11	11	12					
4	2	- 1	0	25	28							
5	2	- 3	0	25	28	15	15					
6	3	- 0	0	16	18							
7	3	- 2	0	16	18	19	22					
8	3	- 4	0	16	18	19	11	11	12			
9	4	- 1	0	12	13	14	14					
10	4	- 3	0	12	13	14	14	15	15			
11	5	- 0	0	10	9	11	12					
12	5	- 2	0	10	9	11	12	11	22			
13	5	- 4	0	10	9	11	12	11	11	11	12	

* AF y DF representan, respectivamente, el número de riegos antes y después de la floración.

CUADRO 5

RENDIMIENTO DE GRANOS EN TON/HA.
EXPERIMENTO CENAMAR

TRATAMIENTO	REPETICION				PROMEDIO
	I	II	III	IV	
1	3900	2744	3424	1040	2777
2	4600	3554	5755	4876	4696
3	5307	4355	5957	6140	5439
4	4037	7622	3909	6153	5430
5	7935	6743	9578	6545	7700
6	5118	6319	6015	3542	5242
7	8128	8142	5396	7619	7321
8	10033	8786	9345	8760	9231
9	6245	7415	7555	4735	6487
10	7966	5235	7931	9625	7689
11	6331	6524	4740	5740	5833
12	8540	5636	7638	7350	7291
13	7900	8411	9272	8661	8561

5.2 Experimento del Distrito de Riego de TULA

El distrito de riego de TULA se localiza en la zona denominada Valle del Mezquital y está situado en la parte Suroeste del Estado de Hidalgo, comprendida entre los paralelos 19° 53' y 20° 30' de latitud norte y entre los meridianos 98° 57' y 99° 30' de longitud oeste. Su clima se clasifica (SARH (1978b)), de acuerdo a Thornthwaite, como CdB'a, provincia de humedad C subhúmeda con vegetación pastal y humedad deficiente en todas las estaciones y la temperatura se clasifica idénticamente a la existente en la Región Lagunera.

El experimento se realizó en el ciclo agrícola primavera-verano de 1980 empleando maíz H-133 y su objetivo fue obtener una función de producción del uso de agua por el cultivo. En este caso la variable independiente empleada fue la tensión del suelo antes y después de la floración del cultivo (SARH (1980)).

El suelo cultivado, de textura migajón arcillo-arenoso, pertenece a la serie de suelos Progreso, que tiene poco espesor y está asentado sobre una capa de caliza fracturada.

Debido al poco espesor del suelo cultivable, se ha dividido la capa de espesor original de 30 cm en dos de iguales características con 15 cm de espesor, con el objetivo de mejorar la cuantificación de los flujos de agua y sales en el perfil. En el cuadro 6 se describen las características físico-químicas del suelo importantes para la operación del modelo.

El área experimental estuvo anteriormente sembrada con maíz en el ciclo agrícola de Primavera-Verano de 1979, con trigo en el invierno de 1978-79, sin estar cultivado en el Invierno de 1979-1980. A lo largo del período mencionado no se fertilizó el suelo y en el ciclo Primavera-Verano de 1980 la dosis de fertilización aplicada fue de 80 kg/ha de nitrógeno y 40 kg/ha de fósforo.

CUADRO 6

CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS DEL SUELO

EXPERIMENTO TULA

Profundidad (cm)	Capacidad de campo (%)	Punto de marchitamiento permanente (%)	Densidad aparente (g/cm ³)	Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (mmhos/cm a 25°C)
0 - 15	27.89	15.15	1.21	1.43
15 - 30	27.89	15.15	1.21	1.43

Para el riego se utilizó aguas negras provenientes de la ciudad de México. La conductividad eléctrica del agua fue de 2.0 mmhos/cm a 25°C, clasificada como C₃ S₁ y altamente salina.

La siembra se efectuó el 10. de abril y la cosecha el 18 de septiembre, con una duración del ciclo de cultivo de 171 días.

El factor determinante para la aplicación del riego fue la tensión del suelo, la cual se calculó en función de su contenido de humedad, determinada por método gravimétrico y a través del empleo de su curva de retención.

El riego se realiza a cinco diferentes valores de tensión del suelo antes y después de la floración (2, 6, 9, 12 y 15 atm). Con un diseño experimental de bloques al azar, con cuatro repeticiones y arreglo de tratamientos en cuadrado doble se obtiene trece tratamientos, los cuales se presentan en el cuadro 7, con el primer riego aplicado el 8 de abril.

Los rendimientos en granos en ton/ha, por tratamiento y repetición, se presentan en el cuadro 8.

En este experimento no se obtuvo la función de producción del uso de agua de riego por cultivo, debido a las lluvias que uniformizaron los tratamientos, no registrándose diferencia significativa entre los tratamientos.

5.3 Calibración del Modelo

5.3.1 Datos Complementarios

Para poder realizar la calibración de acuerdo a los experimentos anteriormente descritos y según los requerimientos de datos del modelo, se describe a continuación la información complementaria para la realización de este proceso.

CUADRO 7

INTERVALO ENTRE RIEGOS (DIAS) Y LAMINAS DE RIEGO (CM.)

EXPERIMENTO TULA

TRATAMIENTO	TENSION (ATMOSFERAS)*				NUMERO DE RIEGO										
	PROGRAMADO		REALIZADO		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	AF	DF	AF	DF											
1	2	-	2	3.1	-	1.7	0	14	42	10	17	8	9	13	26
							16.8	18.0	13.4	14.0	13.0	12.5	16.7	16.6	12.0
2	2	-	9	3.1	-	9.3	0	14	42	10	25	28			
							16.8	18.0	13.4	15.3	18.8	16.0			
3	2	-	15	3.1	-	12.6	0	14	42	10	25	49			
							16.8	18.0	13.4	15.3	20.0	12.0			
4	6	-	6	4.7	-	6.8	0	22	35	13	20	23			
							16.8	18.7	14.0	16.0	17.8	18.0			
5	6	-	12	4.7	-	10.3	0	22	35	13	20	43			
							16.8	18.7	14.0	16.0	19.6	13.0			
6	9	-	2	7.6	-	1.7	0	59	17	9	6	9	14	26	
							19.5	15.0	14.5	12.5	12.7	16.6	16.5	12.0	
7	9	-	9	7.6	-	9.7	0	59	17	15	28				
							19.5	15.0	14.5	18.9	16.4				
8	9	-	15	7.6	-	12.8	0	59	17	18	46				
							19.5	15.0	14.5	19.2	12.3				
9	12	-	6	11.7	-	7.0	0	64	20	13	21				
							19.5	16.8	14.2	17.9	16.7				
10	12	-	12	11.7	-	7.6	0	64	23	47					
							19.5	16.8	18.7	13.8					
11	15	-	2	12.0	-	1.7	0	66	18	7	9	14	26		
							19.5	16.9	13.0	12.7	16.8	16.3	11.0		
12	15	-	9	12.0	-	8.4	0	66	25	28					
							19.5	16.9	19.0	15.5					
13	15	-	15	12.0	-	15.5	0	66	25	52					
							19.5	16.9	19.9	10.2					

*AF y DF representan, respectivamente, la tensión en el suelo antes y después de la floración.

CUADRO 8

RENDIMIENTO EN GRANOS EN TON/HA.
EXPERIMENTO TULA

TRATAMIENTO	REPETICION				PROMEDIO
	I	II	III	IV	
1	12179	10803	9693	11779	11114
2	6631	7829	10625	9249	8584
3	6453	8983	9782	10004	8805
4	9826	9515	11513	9027	9970
5	7829	7607	10581	10581	9149
6	9604	10581	9643	9427	9815
7	9427	10403	8628	7208	8915
8	7385	9205	8228	10270	8772
9	7518	9915	8850	9205	8872
10	6009	8317	9782	10314	8605
11	10980	8095	10448	9649	9793
12	8761	9027	8539	9471	8949
13	6275	8539	7429	7962	7551

Inicialmente se requiere el conocimiento de la humedad correspondiente a la saturación de cada una de las capas del suelo consideradas en la simulación. Para esto se emplea el criterio de que la humedad correspondiente a la saturación es aproximadamente igual al doble (Bresler 1967) de la correspondiente a la capacidad de campo. En el cuadro 9 se indican los valores considerados en ambos experimentos.

El contenido inicial de humedad del suelo, en los experimentos analizados, no interfiere en la simulación debido a que con el primer riego se uniformiza el contenido de humedad de estas capas. Sin embargo, estos valores iniciales, cuando el primer riego se aplica mucho después de la siembra, o antes de ésta, puede tener gran importancia e influir en el balance de agua y sales del suelo.

Los valores iniciales de la lámina de agua disponible, adicional de aquella que el suelo puede almacenar cuando está con la humedad correspondiente al punto de marchitamiento permanentemente es, en cada capa, de 3 cm para el experimento CENAMAR y de 2 cm para TULA.

El rendimiento máximo en ambos experimentos fue considerado igual al mayor valor observado en cada caso, debido a que en TULA no se ha podido establecer función de producción y la del CENAMAR está en función del número de riegos, y además es monótonamente creciente, lo que hace que no exista límite para el rendimiento máximo. Su empleo se considera sujeto a las siguientes condiciones:

CUADRO 9

HUMEDAD CORRESPONDIENTE A LA SATURACION

EXPERIMENTO CENAMAR Y TULA

Experimento	PROFUNDIDAD (cm)		
	0 - 30	30 - 60	60 - 90
CENAMAR	58.00	54.00	50.00
TULA	0 - 15	15 - 30	
	55.00	55.00	

- a) No se ha sometido el cultivo a tensión por déficit de agua en el suelo, incluido el efecto de las sales.
- b) La eficiencia promedio de aplicación de nitrógeno es la máxima.
- c) La suma de la fertilidad residual del suelo, con la dosis de fertilizantes aplicada, proporciona el rendimiento máximo.

Para ingresar al modelo parabólico de determinación del rendimiento máximo se consideraron nulos todos los coeficientes, con excepción del término independiente, que para este caso se iguala al rendimiento máximo.

El ciclo del cultivo se dividió en 5 etapas fenológicas, con duraciones establecidas según Hanway (1963) y Doorenbos y Kassam (1979), las cuales difieren en cada uno de los experimentos. Para CENAMAR la primera etapa tiene duración de 20 días y corresponde al período que va de la siembra hasta la emergencia; la segunda de 35 días, corresponde al crecimiento vegetativo; la tercera de 18 días, corresponde a la floración; la cuarta etapa, formación de grano lechoso, con 40 días; y maduración con una duración de 14 días. Para TULA tales períodos correspondieron a 25, 66, 20, 45, y 15 días, respectivamente.

En cuanto a los suelos de ambos experimentos, con los cuadros 1 y 2 se deter

minó sus números de escurrimiento para siembra en hilera recta en condiciones hidrológicas buenas, representando este valor el promedio de los grupos de suelo B y C, dando como resultado un valor de $N = 82$. Para la conductividad hidráulica se consideró el valor de 0.001 cm/día.

Los parámetros de la función de desarrollo radicular, expresada con la ecuación (6), fueron de 90 cm para la máxima profundidad radicular, alcanzada en 75 días, en el experimento CENAMAR. Para el experimento TULA estos valores fueron de 30 cm y 30 días, respectivamente.

Para la interacción del nitrógeno con el nivel de humedad del suelo se empleó, para ambos experimentos, los parámetros de la ec.(13) que representa esta interacción.

Finalmente en lo que se refiere a los datos complementarios, las fechas recomendables por la SARH (1978 a, b), para la siembra del maíz en la Región Lagunera, es del primero de mayo al 15 de junio, y en el Valle Mezquital es del 15 de marzo al 30 de abril. Las siembras posteriores a estas fechas implican una reducción del rendimiento máximo de 0.7% diario en ambas regiones.

5.3.2 Resultados y Discusión.

Como punto de partida para la calibración del modelo se han empleado los valores sugeridos por Hanks y Hill (1980), un valor de b en la ec.(4) igual a 0.5 y valores de α en la ec.(1) iguales a 0.0; 0.4; 0.4; 0.4; y 0.0, para cambiarlos posteriormente en función de los resultados obtenidos.

Inicialmente se mantienen constantes los valores de α_j con el objetivo de obtener una recta de regresión, donde la variable independiente es el rendimien

to real y la variable dependiente es el rendimiento simulado, que más se aproxime al ideal.

En el experimento CENAMAR la mejor aproximación a las condiciones ideales ocurre con el valor de $b = 0.5$ y los valores de $\alpha_i = 0.0; 0.7; 0.2; 0.1; \text{ y } 0.0$, con los resultados que se presentan en el cuadro 10.

La recta de regresión tiene para ordenada en el origen 87 kg/ha y su pendiente es de 1.007, con un coeficiente de determinación de 85%.

Los parámetros que proporcionan el mejor resultado para el ajuste del experimento TULA corresponden a $b = 0.2$ y $\alpha_i = 0.0; 0.3; 0.2; 0.6; \text{ y } 0.0$, presentándose los resultados en el cuadro 11, con una ordenada en el origen de -24 kg/ha y una pendiente de 1.000, con 86.7% de coeficiente de determinación.

En la gráfica 2 están representados los valores simulados y observados en la calibración de los dos experimentos en estudio.

Sin embargo, la importancia de obtener un buen ajuste de los datos simulados con los observados o reales, está dada por dos aspectos, el primero es el rendimiento máximo obtenible bajo condiciones de no castigar el cultivo y el segundo a la variabilidad de los resultados experimentales.

En cuanto al máximo rendimiento obtenible se puede observar en el cuadro 5 que para el experimento CENAMAR este ocurrió para el tratamiento 8, en tanto que el tratamiento 13 con dos riegos más en el período de pre-floración proporciona menor rendimiento, a diferencia de los resultados presentados por el modelo (cuadro 10), donde el tratamiento 13 que por recibir mayores cantidades de agua, proporciona el mayor rendimiento. De acuerdo al

CUADRO 10

RENDIMIENTOS SIMULADOS PARA $b = 0.5$

$Y \alpha_i = 0.0; 0.7; 0.2; 0.1 \text{ y } 0.0$

EXPERIMENTO CENAMAR

TRATAMIENTO	RENDIMIENTO REAL (KG/HA)	RENDIMIENTO SIMULADO (KG/HA)	DESVIACION (%)
1	2777	1868	-32.8
2	4696	5438	+15.8
3	5439	5632	+ 3.5
4	5430	6418	+18.2
5	7700	7460	- 3.1
6	5242	4430	-15.5
7	7331	7676	+ 4.7
8	9231	7968	-13.7
9	6487	7153	+10.3
10	7689	8358	+ 8.7
11	5833	5991	+ 2.7
12	7291	8373	+14.8
13	8561	8698	+ 1.6

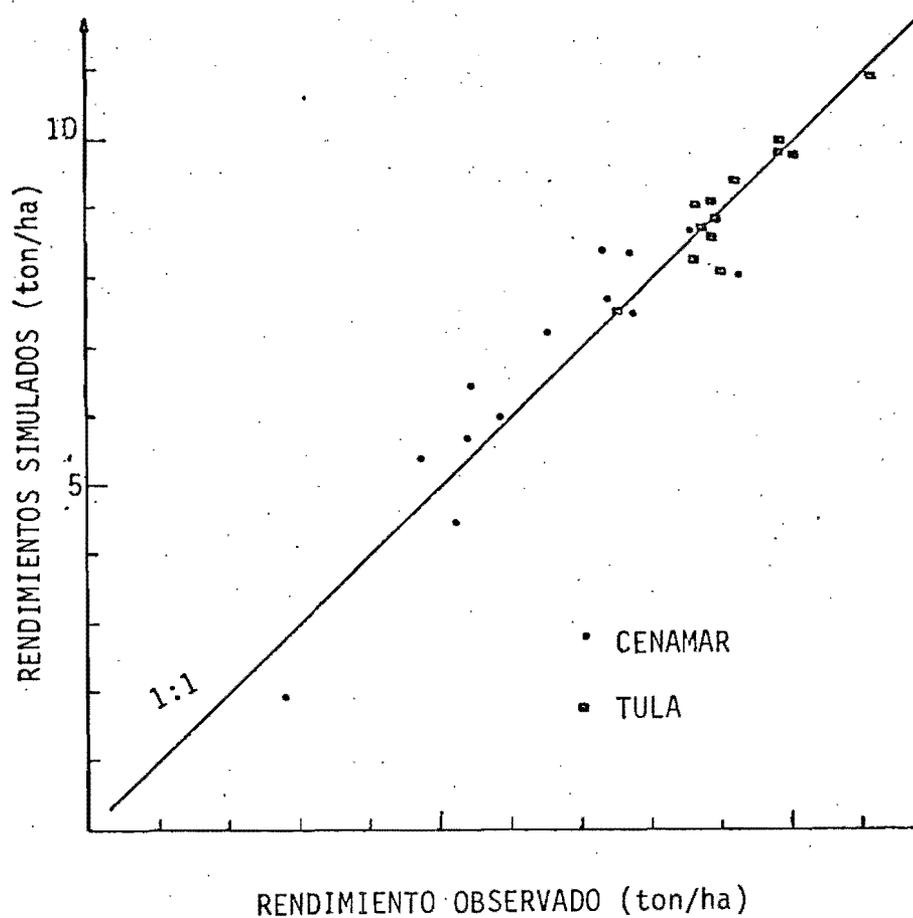
CUADRO 11

RENDIMIENTOS SIMULADOS PARA $b = 0.2$ y $\alpha_i = 0.0: 0.3: 0.2: 0.6$ y 0.0

EXPERIMENTO TULA

TRATAMIENTO	RENDIMIENTO REAL (KG / HA)	RENDIMIENTO SIMULADO (KG/HA)	DESVIACION (%)
1	11114	10982	- 1.2
2	8584	9004	+ 4.9
3	8805	8658	- 1.7
4	9970	9824	- 1.5
5	9149	9429	+ 3.1
6	9215	10158	+ 3.5
7	8916	8874	- 0.5
8	8772	8772	0.0
9	8872	9129	+ 2.9
10	8605	8206	- 4.6
11	9793	9861	+ 0.7
12	8949	8098	- 9.5
13	7551	7572	+ 0.3

FIGURA 2
RESULTADOS DE LA CALIBRACION PARA LOS EXPERIMENTOS
CENAMAR Y TULA



propio autor del experimento (Moreno Rubio (S D)) el máximo rendimiento, según la regresión determinada, debería ocurrir para el tratamiento 13.

En el experimento TULA, las más bajas tensiones del suelo (en valor absoluto) antes y después de la floración, las cuales presentan el mayor número de riegos, proporcionan el mayor rendimiento (cuadro 11), también considerado por el modelo como máximo obtenible.

Aunque los reportes de los experimentos no indican diferencia significativa entre los resultados de las repeticiones, tal variabilidad limita las posibilidades de inferir sobre los resultados obtenidos como respuesta del modelo. En efecto, con un coeficiente de determinación de 85% en el experimento CENAMAR, los resultados simulados estuvieron dentro del intervalo representado por las repeticiones, a excepción del tratamiento 8 correspondiente al rendimiento máximo. Lo mismo se puede decir de los resultados obtenidos para el experimento TULA, donde únicamente el experimento 12 presentó un resultado no incluido por el intervalo representado por las repeticiones.

Los resultados de los parámetros de la calibración permiten asociar el valor de b con la profundidad del suelo cultivado. Es así que en el experimento CENAMAR, con un espesor de 90 cm., se confirma el valor de 0.5 atribuido por Hanks y Hill (1980). En el experimento TULA se atribuye al poco espesor del suelo cultivable (30 cm), el bajo valor de b (0.2), lo que ha permitido que el cultivo no sufra tensión aún con bajos contenidos de humedad en el suelo, hecho que sucede en esta localidad como lo indican los resultados de los tratamientos realizados en el experimento (cuadros 7 y 8).

En cuanto a los valores de α , entre las etapas más significativas para la com

posición del rendimiento (siempre y cuando pueda haber germinación en condiciones adecuadas, lo que se logra con un primer riego próximo a la siembra), considerándose el conjunto de tratamientos del experimento CENAMAR, el mayor valor ocurrió para la etapa donde fue mayor la relación (T/TM), confirmándose de esta manera lo planteado por Hanks y Hill (1980) de ser coeficientes em píricos que representan la importancia de esta relación en cada etapa de desarrollo del cultivo. Tal conclusión también es válida para el experimento TULA, correspondiendo los valores de α a la importancia de la mencionada relación.

La otra prueba a que se ha sometido el modelo (en cuanto a la salinidad), se realizó modificándose el valor de las láminas de riego en los tratamientos número 10 de ambas localidades. En el experimento CENAMAR las láminas de riego se han multiplicado por factores mayores que uno. En consecuencia de este incremento aumenta la transpiración del cultivo, y su correspondiente rendimiento, debido a la reducción en la concentración salina del extracto de saturación del suelo, como puede verse en el cuadro 12, donde la concentración salina corresponde al día en que se realizó la cosecha.

Para el experimento TULA se han reducido las láminas de riego, registrándose efecto opuesto al observado en el experimento anterior. Los resultados se presentan en el cuadro 13, donde los factores multiplicadores operan sobre las láminas de riego aplicadas en el tratamiento considerado.

Para el análisis de los resultados se requiere considerar las concentraciones salinas iniciales del extracto de saturación del suelo y la concentración salina del agua de riego en ambos experimentos.

CUADRO 12

EVALUACION DE LA CONCENTRACION SALINA AL FINAL DEL CICLO DE CULTIVO, POR CAPAS,
 PARA DOSIS DE RIEGO MULTIPLICADA POR FACTORES DE 1.1 A 1.5. EXPERIMENTO CENAMAR,
 TRATAMIENTO No. 10

FACTOR MUL- TIPLICADOR DE RIEGO	RENDIMIENTO SIMULADO (ton/ha)	CONCENTRACION SALINA POR CAPA (meq/l)		
		0 - 30 cm	30 - 60 cm	60 - 90 cm.
1.0	8358	15.20	17.81	16.26
1.1	8462	14.44	16.88	15.88
1.2	8505	13.57	16.15	14.92
1.3	8524	12.89	15.23	14.28
1.4	8543	12.27	14.46	13.69
1.5	8562	11.67	13.84	13.20

En el experimento CENAMAR la concentración salina del agua de riego (8.5 meq/l) es inferior a la del extracto de saturación del suelo (20, 16, y 12 meq/l), lo que indica que el riego contribuye con una moderada cantidad de sales para el suelo, pero también puede representar un lavado del suelo en función de la lámina aplicada.

En este ciclo de cultivo se registró escasa precipitación, y considerándose que las láminas de riego mayores que las requeridas para llevar hasta la capacidad de campo el perfil del suelo, no contribuyen para incrementar la transpiración del cultivo, pero si favorecen el lavado del suelo, se puede explicar la regularidad de los resultados simulados del cuadro 12.

En el experimento TULA la concentración salina del agua de riego (20 meq/l) es superior a las del extracto de saturación del suelo (14.3 meq/l), además las láminas de riego sobrepasan en mucho las requeridas para llevar hasta la capacidad de campo el perfil del suelo, registrándose lluvias capaces de drenar las sales del perfil del suelo a la capa inferior, a través de las fracturas de la caliza. (cuadro 13).

En el cuadro 13 se obtiene para un factor multiplicador de 0.6, un rendimiento superior al que se obtiene cuando este factor es igual a 1.0, aún cuando las concentraciones salinas al final del ciclo son mayores en el primer caso. Lo anterior ocurre debido a que no se realiza de forma completa lo planteado por Bresler (1967) para permitir el empleo de la ecuación (24), que requiere que la lámina de riego sea superior a la suma del déficit de humedad de la capa, hasta la capacidad de campo, con dos veces la lámina de agua que el suelo puede almacenar (hasta la saturación). Es así que con una lámina de riego menor hubo inicialmente una menor acumulación de sales en el perfil del suelo,

CUADRO 13

EVALUACION DE LA CONCENTRACION SALINA AL FINAL DEL CICLO DE CULTIVO, POR CAPAS, PARA DOSIS DE RIEGO MULTIPLICADAS POR FACTORES DE 0.6 A 0.2. EXPERIMENTO TULA, TRATAMIENTO No. 10

FACTOR MULTIPLICADOR DE RIEGO	RENDIMIENTO SIMULADO (ton/ha.)	CONCENTRACION SALINA POR CAPA (meq/l)	
		0 - 15 cm	15 - 30 cm
1.0	8206	22.66	23.90
0.6	8222	25.43	24.75
0.5	8202	26.23	25.12
0.4	8170	26.56	25.95
0.3	8201	25.99	27.41
0.2	7509	22.36	24.68

lo cual permitió una mayor transpiración del cultivo en las tres primeras etapas de su desarrollo. Posteriormente, cuando el factor multiplicador es 0.6, el riego se aplica hasta que las láminas de agua disponibles en el suelo están más reducidas. En estas condiciones ocurre una mayor retención de sales en el perfil del suelo, rebasando, a partir del penúltimo riego, las concentraciones salinas del caso de comparación (1.0). Sin embargo, la consecuente reducción de la transpiración no es suficiente para reducir el rendimiento.

Procesos similares han ocurrido para los demás casos, donde la transpiración del cultivo en la primera etapa aumentó con la reducción, hasta 0.3, del factor multiplicador del riego. Sin embargo, la transpiración del cultivo en esta primera etapa está afectada por un coeficiente $\alpha = 0.0$ y no influye en la composición del rendimiento. Al comparar los resultados cuando los factores multiplicadores de riego son 0.3 y 0.4, existe similitud con lo observado para los factores 1.0 y 0.6: la transpiración en las tres primeras etapas de desarrollo del cultivo, cuando el factor es de 0.3, fue superior a las correspondientes para el factor 0.4. Por último, con el factor 0.2 hubo riegos con láminas insuficientes para llevar hasta la capacidad de campo el perfil del suelo, con menor transpiración y rendimiento, además de una menor adición de sales.

En lo que se refiere a la eficiencia promedio de aplicación del nitrógeno (EPAN), relativa a la interacción entre este nutriente y las láminas de agua (riego y precipitación), los resultados se presentan con poca variabilidad y próximos a la unidad, revelando, como era de esperarse, una pequeña influencia sobre el rendimiento máximo obtenible. En el cuadro 14 se muestran los resultados correspondientes a los dos experimentos, para sus respectivos pa-

CUADRO 14

EFICIENCIA PROMEDIO DE APLICACION DEL NITROGENO (EPAN), POR
TRATAMIENTO

EXPERIMENTOS CENAMAR Y TULA

TRATAMIENTO	EPAN CENAMAR	EPAN TULA
1	.96	1.00
2	.98	1.00
3	.99	1.00
4	.98	1.00
5	.99	1.00
6	.97	1.00
7	.99	.99
8	1.00	.99
9	.98	.99
10	1.00	.99
11	.98	1.00
12	.99	.99
13	1.00	.99

rámetros de calibración.

5.4 Verificación del Modelo

El modelo se verifica en función de lo que de él se requiere, esto es, definir el rendimiento de la cosecha en función de las políticas de riego establecidas de acuerdo a los mínimos contenidos permitidos de humedad aprovechable y residual en el suelo, para que ocurra un riego que lleve hasta la capacidad de campo el perfil del suelo simulado.

Las políticas de riego señaladas en los cuadros 15 y 16 se aplican a las cuatro primeras etapas del ciclo de cultivo (emergencia, crecimiento vegetativo, floración y formación del grano), y no se permite la aplicación de riego en la última etapa (maduración). Las fechas y el número de riegos fueron establecidos por el modelo de acuerdo a la política de riego considerada.

Un nuevo riego es aplicado cuando la humedad aprovechable de la capa superficial desciende por primera vez a un valor inferior al definido por la política de riego, y es por esta razón que en el experimento CENAMAR ocurren riegos iniciales con láminas reducidas. En el transcurso del ciclo de cultivo, cuando éste puede extraer humedad de las capas más profundas y se incrementa (en valor absoluto) la tensión del suelo, cada nuevo riego debe reponer humedad extraída de una capa de suelo de mayor espesor, hasta el límite de la profundidad radicular máxima. Es evidente que cuanto mayor es la humedad residual del suelo, menor es la lámina requerida para llevarlo hasta su capacidad de campo.

En este experimento se limitó al 60 por ciento la política de riego debido al rápido incremento de pequeños riegos, así como el número total de éstos.

CUADRO 15

VERIFICACION DEL COMPORTAMIENTO DEL MODELO PARA DIFERENTES POLITICAS DE RIEGO
EXPERIMENTO CENAMAR

POLITICA DE RIEGO*	No. DE RIEGO	FECHA Y LAMINA DE RIEGO (cm)													LAMINA TOTAL DE RIEGO (cm)	CONCENTRACION SALINA meq/litro			RENDIMIENTO SIMULADO (TON/HA.)	
																0-30 (cm)	30-60 (cm.)	60-90 (cm.)		
A	1	24/8 15.1														15.1	16.19	17.57	13.59	1399
B	2	24/7 13.9	27/8 14.0													27.9	14.66	17.81	15.16	5528
C	5	13/6 8.2	2/7 5.6	31/7 12.7	26/8 12.6	27/9 12.3										51.4	15.24	15.85	15.81	7600
D	6	12/6 7.6	29/6 4.8	8/7 4.5	31/7 11.4	21/8 11.0	15/9 10.8									50.1	15.58	16.51	16.41	8336
E	8	11/6 7.0	26/6 3.7	3/7 3.7	10/7 3.8	29/7 10.0	16/8 10.0	6/9 9.5	28/9 9.4							57.1	15.52	16.52	17.52	8671
F	9	11/6 7.0	25/6 3.4	1/7 3.1	7/7 3.3	13/7 3.4	30/7 9.0	14/8 8.9	30/8 8.3	19/9 8.1						54.5	15.79	17.00	16.77	8835
G	13	11/6 7.0	15/6 2.4	23/6 2.6	28/6 2.6	2/7 2.5	7/7 2.8	11/7 2.5	20/7 5.2	2/8 7.3	15/8 7.5	27/8 6.6	12/9 6.9	27/9 6.5	62.4	15.29	15.68	16.11	9041	

105

* Las políticas de riego de A a G representan aplicar un nuevo riego cuando la humedad aprovechable residual en el suelo es de 0, 10, 20, 30, 40, 50 y 60 porciento, respectivamente.

CUADRO 16

VERIFICACION DEL COMPORTAMIENTO DEL MODELO PARA DIFERENTES POLITICAS DE RIEGO
EXPERIMENTO TULA

POLITICA DE RIEGO*	No. DE RIEGOS.	FECHA Y LAMINA DE RIEGO (cm)											LAMINA TOTAL DE RIEGO (cm)	CONCENTRACION SALINA meq/litro		RENDIMIENTO SIMULADO (TON/HA.)
		0-15 (cm)		15-30 (cm)												
A	6	21/4 4.7	5/5 4.5	7/6 4.7	29/6 4.6	15/7 4.6	2/9 4.6						27.7	25.57	27.44	8581
B	7	19/4 4.5	1/5 4.4	3/6 4.4	16/6 4.5	6/7 4.5	2/8 4.4	2/9 4.4					31.1	28.57	29.53	9747
C	8	18/4 4.2	29/4 4.2	2/6 4.1	13/6 4.1	29/6 4.0	10/7 4.2	4/8 4.3	30/8 4.2				33.3	28.64	29.63	10623
D	9	11/4 3.6	23/4 4.1	4/5 4.0	2/6 4.1	13/6 4.1	30/6 4.2	9/7 3.9	2/8 4.1	28/8 3.9			36.0	29.12	29.87	10982
E	10	8/4 3.1	22/4 3.8	1/5 3.8	2/6 4.1	12/6 4.0	27/6 3.6	8/7 4.1	17/7 3.6	2/8 3.6	27/8 3.6		37.3	26.65	27.46	11057
F	10	8/4 3.1	22/4 3.8	1/5 3.8	31/5 3.2	8/6 3.4	17/6 3.5	3/7 3.8	12/7 3.8	1/8 3.2	23/8 3.2		34.8	27.14	29.50	11105
G	11	5/4 2.4	21/4 3.5	30/4 3.8	31/5 3.2	8/6 3.4	17/6 3.5	3/7 3.8	10/7 3.0	17/7 2.9	2/8 3.6	24/8 3.5	36.6	25.03	27.08	11110

* Las políticas de riego de A a G representan aplicar un nuevo riego cuando la humedad aprovechable residual en el suelo es de 0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 por ciento, respectivamente.

Es interesante observar el flujo de las sales, la reducción de su concentración en la capa superficial, y el incremento en las capas más profundas. El incremento de las láminas de riego pueden lavar el suelo, reducir aún más las concentraciones de sales y permitir la obtención de mayores rendimientos. Como ya se ha mencionado, son diversas las posibilidades de empleo del modelo, y no se desarrolla en este trabajo el aspecto relacionado con la política de lavado y recuperación de los suelos.

En lo que se refiere al experimento TULA, con su particular característica de poseer suelo de poco espesor, el modelo ha reproducido el máximo rendimiento para una política de riego correspondiente al 30 por ciento. El incremento de las láminas de riego puede permitir la obtención de mayores rendimientos al no permitir que las concentraciones del extracto de saturación del suelo se incrementen por arriba de la concentración del agua de riego. Tal práctica de aplicar grandes láminas de riego fue ampliamente empleada en el experimento en cuestión, proporcionando resultados que de antemano se puede afirmar que son factibles únicamente a bajos precios del agua.

Por último, para la verificación del modelo se puede decir que los resultados para las diferentes políticas de riego, número de riegos y rendimientos simulados, son coherentes entre sí y están de conformidad con los resultados experimentales de ambas localidades.

6. EVALUACION ECONOMICA

Los registros históricos empleados para la evaluación económica corresponden a un período de 5 ciclos de cultivo, de 1979 a 1983. De la estación Lerdo (municipio Lerdo, estado de Durango, latitud $25^{\circ} 30' 00''$, longitud $103^{\circ} 32' 00''$, altitud 1,139 msnm), representativa del distrito de riego 017 (experimento CENAMAR), se dispone de registro hasta 1981, año en que cesa sus actividades. Los años de 1982 y 1983, representativos de este distrito provienen de la estación Torreón (municipio de Torreón, estado de Coahuila, latitud $25^{\circ} 32' 00''$, longitud $103^{\circ} 27' 00''$, altitud 1,124.0 msnm). Para el distrito de riego 003 (experimento TULA), los registros provienen de la estación Mixquiahuala (municipio Mixquiahuala, estado de Hidalgo, latitud $20^{\circ} 14' 05''$, longitud

99° 13' 07", altitud 2,000 msnm).

En cuanto a los datos requeridos para la simulación plurianual, que se inicia el día de la siembra del primer año (1979) y continúa hasta la fecha de cosecha del último año (1983) sin interrupción alguna, con un ciclo de cultivo anual único, estos datos son comunes a los empleados en la calibración. Lo mismo se aplica a las fechas de siembra y cosecha, que se mantienen invariables en todos los ciclos de cultivo.

El valor del rendimiento máximo que se obtiene en cada localidad se mantiene constante a lo largo del período de simulación, lo que implica aceptar que la dosis de fertilización aplicada al suelo es idéntica a la extraída por el cultivo.

Sin embargo, según Pineda (1980), la extracción del nitrógeno por el cultivo del maíz puede variar de 22 a 28 kg/ha por tonelada de rendimiento en granos. En un experimento realizado en Chapingo, Edo. de México, este autor obtuvo los siguientes resultados:

CUADRO 17
NIVEL DE FERTILIZACION DEL SUELO, RENDIMIENTO EN GRANOS
DE MAIZ Y EXTRACCION DE NITROGENO POR EL CULTIVO, SEGUN
PINEDA (1980)

Nivel de Fertilización del suelo con nitrógeno (kg/ha)	Rendimiento en granos (ton/ha)	kg/ha de nitrógeno extraído por el cultivo a lo largo del ciclo vegetativo (kg/ha)
0	4.826	150
40	5.867	170
80	7.337	290
120	7.638	260
160	7.047	285
200	7.242	270

De acuerdo a los resultados del cuadro 17, cuando la fertilización del suelo con nitrógeno es de hasta 40 kg/ha, la extracción es de aproximadamente 30 kg/ha por tonelada de rendimiento, incrementándose la extracción para valores cercanos a 40 kg/ha por tonelada de rendimiento cuando se aumenta la aplicación del nutriente.

De lo anterior se puede afirmar que aún para las más bajas tasas de extracción de nutrientes por el cultivo, las cantidades aplicadas de nutrientes en ambos experimentos (120 kg/ha de nitrógeno y 40 kg/ha de fósforo en CENAMAR y 80 kg/ha de nitrógeno y 40 kg/ha de fósforo en TULA), no son suficientes para mantener en forma constante "indefinidamente" la fertilidad del suelo, registrándose un empobrecimiento nutricional progresivo de éste si se mantienen los mencionados niveles de aplicación de fertilizantes y el monocultivo. Para el experimento TULA, con la aplicación de riego con aguas negras, el cuadro es aún más complejo y únicamente la medición periódica del nivel de fertilidad del suelo, al inicio de cada ciclo de cultivo, aunada al conocimiento de la dosis aplicada, podrá permitir la determinación precisa del máximo rendimiento.

Hechas las consideraciones anteriores y de acuerdo a los datos referentes a cada localidad, se obtuvieron los resultados presentados en los cuadros siguientes. Los cuadros del 18 al 26 se refieren al experimento CENAMAR y las políticas de riego del I al IX representan la aplicación de riego cuando la humedad aprovechable residual en la capa superficial del suelo desciende del 80 hasta el cero por ciento (a cada 10 por ciento), respectivamente. Los cuadros del 27 al 35 se refieren al experimento TULA y las políticas de riego del I al IX representan la aplicación de riego cuando la humedad aprovechable re-

sidual en la capa superficial del suelo desciende del 40 hasta el cero por ciento, a intervalos de 5 por ciento, respectivamente.

Para realizar la evaluación económica con precios* referidos a la cosecha de 1984, se efectuaron las siguientes consideraciones:

- a) Los precios pagados al productor se consideran iguales a los precios de garantía, en todos los ciclos de cultivo, aunque variables en función del mercado y de la capacidad del Estado para absorber la producción, entre otros factores (SARH (1982)).
- b) Los factores de actualización de los precios están dados por la propia relación que se mantiene entre los precios de garantía para la producción a cada año de cultivo, lo que hace que el precio actual establecido por la SARH (NOTISARH, mayo 5, 1984), de \$ 28,500.00/ton para el maíz, se aplique para la suma de la producción en todos los ciclos, con objeto de calcular el valor presente del beneficio neto que se obtiene a lo largo de todo el período de simulación.
- c) Lo mismo se puede considerar para la relación que existe entre los precios de los fertilizantes, los cuales son, según FERTIMEX, de \$ 7,690.00/ton de sulfato de amonio (20.5%) y \$ 7,390.00/ton de superfosfato de calcio simple (19.5%) (en saco).

Con estos precios de fertilizantes y de acuerdo a las dosis aplicadas en cada ciclo de cultivo, el costo de este insumo es de aproximadamente \$ 6,000.00 en

* Los precios, en moneda nacional, están referidos a mayo de 1984.

CUADRO 18

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO CENAMAR
PARA LA POLITICA DE RIEGO I

AÑO	NO. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	17	43.6	9.131
80	18	60.3	9.128
81	17	49.6	9.222
82	18	57.9	9.197
83	17	56.0	9.226
	SUMA:	267.4	45.904

CUADRO 19

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO CENAMAR
PARA LA POLITICA DE RIEGO II

AÑO	NO. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	11	40.2	9.110
80	13	60.1	9.109
81	10	40.5	9.194
82	12	56.8	9.158
83	12	53.5	9.196
	SUMA:	251.1	45.767

CUADRO 20

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO CENAMAR
PARA LA POLITICA DE RIEGO III

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	8	38.2	8.999
80	10	60.5	9.047
81	8	43.4	9.163
82	10	58.6	9.119
83	9	<u>50.3</u>	<u>9.160</u>
	SUMA:	251.0	45.488

CUADRO 21

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO CENAMAR
PARA LA POLITICA DE RIEGO IV

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	6	33.2	8.758
80	8	57.3	8.918
81	6	39.0	8.911
82	7	50.3	8.928
83	7	<u>52.2</u>	<u>9.016</u>
	SUMA:	232.0	44.531

CUADRO 22

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO CENAMAR
PARA LA POLITICA DE RIEGO V

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	5	34.1	8.567
80	6	51.6	8.737
81	5	39.0	8.833
82	4	40.5	8.703
83	6	<u>53.9</u>	<u>8.913</u>
	SUMA:	219.1	43.753

CUADRO 23

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO CENAMAR
PARA LA POLITICA DE RIEGO VI

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	4	34.7	8.111
80	5	50.9	8.383
81	4	36.6	8.596
82	5	54.7	8.494
83	5	<u>42.7</u>	<u>8.616</u>
	SUMA:	219.6	42.200

CUADRO 24

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO CENAMAR
PARA LA POLITICA DE RIEGO VII

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	2	21.3	6.901
80	4	52.0	7.915
81	3	33.8	7.947
82	3	36.3	7.858
83	4	<u>48.7</u>	<u>7.932</u>
	SUMA:	192.1	38.553

CUADRO 25

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO CENAMAR
PARA LA POLITICA DE RIEGO VIII

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	2	27.6	5.535
80	2	32.3	5.810
81	2	30.1	6.690
82	3	48.0	7.024
83	2	<u>27.6</u>	<u>6.251</u>
	SUMA:	165.6	31.310

CUADRO 26

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO CENAMAR
PARA LA POLITICA DE RIEGO IX

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha)
79	0	0	2.955
80	1	20.7	4.452
81	1	17.1	4.467
82	1	20.8	4.680
83	1	<u>20.8</u>	<u>4.391</u>
	SUMA:	79.4	20.945

CUADRO 27

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO TULA PARA
LA POLITICA DE RIEGO I

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	18	46.9	11.114
80	20	59.4	11.114
81	17	49.3	11.114
82	20	58.8	11.114
83	22	<u>63.5</u>	<u>11.106</u>
	SUMA:	277.9	55.562

CUADRO 28

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO TULA PARA
LA POLITICA DE RIEGO II

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	16	46.9	11.114
80	17	54.9	11.114
81	14	47.3	11.114
82	19	62.4	11.106
83	19	<u>59.3</u>	<u>11.098</u>
	SUMA:	270.8	55.546

CUADRO 29

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO TULA PARA
LA POLITICA DE RIEGO III

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	15	48.0	11.106
80	16	57.3	11.100
81	14	50.2	11.112
82	17	57.8	11.076
83	18	<u>61.8</u>	<u>11.051</u>
	SUMA:	275.1	55.445

CUADRO 30

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO TULA PARA
LA POLITICA DE RIEGO IV

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	14	46.6	11.099
80	14	52.3	11.074
81	12	44.5	11.101
82	16	58.3	11.046
83	16	<u>58.6</u>	<u>10.997</u>
	SUMA:	260.3	55.317

CUADRO 31

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO TULA PARA
LA POLITICA DE RIEGO V

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	11	41.2	11.000
80	14	54.0	11.002
81	11	44.5	11.013
82	14	55.2	10.887
83	14	<u>55.2</u>	<u>10.864</u>
	SUMA:	250.1	54.766

CUADRO 32

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO TULA PARA
LA POLITICA DE RIEGO VI

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	10	39.5	10.910
80	12	48.5	10.899
81	9	38.2	10.944
82	14	57.0	10.633
83	14	57.8	10.807
	SUMA:	241.0	54.183

CUADRO 33

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO TULA PARA
LA POLITICA DE RIEGO VII

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	10	42.3	10.314
80	9	39.9	10.369
81	8	35.8	10.797
82	12	53.1	9.941
83	11	48.4	9.696
	SUMA:	219.5	51.117

CUADRO 34

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO TULA PARA LA
POLITICA DE RIEGO VIII

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	8	35.2	9.157
80	8	37.2	9.034
81	8	37.4	10.090
82	11	50.7	8.453
83	8	<u>37.4</u>	<u>7.963</u>
	SUMA:	197.9	44.697

CUADRO 35

SIMULACION PLURIANUAL PARA EL EXPERIMENTO TULA PARA LA
POLITICA DE RIEGO IX

AÑO	No. DE RIEGOS	LAMINA TOTAL (cm.)	RENDIMIENTO (ton/ha.)
79	7	32.0	7.886
80	6	29.2	7.429
81	5	24.7	8.412
82	7	34.0	6.856
83	7	<u>33.5</u>	<u>6.669</u>
	SUMA:	153.4	37.252

el distrito de riego No. 17 y 4,500.00 en el distrito de riego No. 03, por cada ciclo de cultivo y por hectárea.

Finalmente, el valor presente del beneficio neto obtenido a lo largo del período de simulación (5 ciclos de cultivo) VPBN, se define a través de:

$$VPBN = 28,500 * SP - 5 * CF - PAG * LTA \quad (31)$$

donde SP es la suma de la producción a lo largo del período de simulación, CF es el costo de los fertilizantes en cada ciclo de cultivo, PAG es el precio unitario del volumen de agua aplicado al suelo como riego y LTA es la suma de la lámina total de agua de riego aplicada a lo largo del período de simulación.

El beneficio neto que se considera es el que obtiene el productor y su valor máximo ocurre para un precio nulo del agua. Sin embargo, es este precio el que propicia una utilización irracional del recurso y fomenta su derroche. Una discusión amplia sobre el precio del agua en irrigación se encuentra en Olaiz y Pérez (1977).

Los precios del agua que se establecen en el presente trabajo únicamente representan los valores límites a partir de los cuales, a los productores, les conviene el cambio de política de riego. Además, estos precios pueden servir de guía para los órganos responsables de la operación, construcción y mantenimiento de la infraestructura de riego, para evaluar los límites de precios que promueven la contracción de la demanda del agua.

Cuando se aplica la ecuación (31) para dos diferentes políticas de riego, se obtiene el precio del agua que establece el límite de adecuación del uso de

una u otra política. Los valores de SP y LTA, para cada política de riego se presentan en el cuadro 36 para el experimento CENAMAR y en el cuadro 37 para el experimento TULA.

La aplicación sucesiva de esta ecuación permite las siguientes conclusiones, con el precio del agua referido al millar de metros cúbicos:

a) Experimento CENAMAR

- 1- Para un precio del agua inferior a \$ 2,395.00 la política de riego que produce el mayor beneficio neto es no permitir que la humedad aprovechable residual en el suelo baje a niveles inferiores a 80 o más por ciento.
- 2- Precios del agua superiores a \$ 2,395.00 e inferiores a \$ 17,937.00 hacen que la política de riego más conveniente al productor sea la correspondiente al 70 por ciento.
- 3- Comparada con la política de 60 y 50 por ciento, la política de riego a 40 por ciento de humedad residual en el suelo presenta valores más redituables a partir del límite de \$ 17,937.00. Esto se debe a que la reducción en el rendimiento, consecuencia de la aplicación de una lámina de riego menor, fue proporcionalmente inferior, además de haber ocurrido un mejor aprovechamiento de la precipitación.
- 4- Políticas de riego inferiores al 40 por ciento son redituables a partir de límites lejanos.

CUADRO 36

VALORES DE SP Y LTA (ecuación 31) PARA DIFERENTES
POLITICAS DE RIEGO. EXPERIMENTO CENAMAR

Política de Riego*	SP (ton/ha)	LTA (cm)
I	45.904	267.4
II	45.767	251.1
III	45.488	251.0
IV	44.531	232.0
V	43.753	219.1
VI	42.200	219.6
VII	38.553	192.1
VIII	31.310	165.6
IX	20.945	79.4

*Las políticas de riego del I al IX representan la aplicación de riego cuando la humedad aprovechable residual en la capa superficial del suelo desciende del 80 hasta el cero porciento, a intervalos de 10 porciento, respectivamente.

CUADRO 37

VALORES DE SP y LTA (ecuación 31) PARA DIFERENTES
POLITICAS DE RIEGO. EXPERIMENTO TULA

Política de Riego*	SP (ton/ha)	LTA (cm)
I	55.562	277.9
II	55.546	270.8
III	55.445	275.1
IV	55.317	260.3
V	54.766	250.1
VI	54.183	241.0
VII	51.117	219.5
VIII	44.697	197.9
IX	37.252	153.4

*Las políticas de riego del I al IX representan la aplicación de riego cuando la humedad aprovechable residual en la capa superficial del suelo desciende del 40 hasta cero porciento, a intervalos de 5 porciento, respectivamente

b) Experimento TULA

- 1- La política de riego a 40 o más por ciento produce un mayor beneficio neto cuando el precio del agua es inferior a \$ 642.00
- 2- A partir de \$ 642.00 y hasta \$ 6,215.00 la política de riego más redituable es al 35 por ciento.
- 3- Para precios del agua comprendidos entre el límite superior anterior y \$ 15,116.00 conviene el empleo de política al 25 por ciento.
- 4- De \$ 15,116.00 a \$ 18,571.00 la política de riego que permite obtener mayores ingresos es la de 20 por ciento.
- 5- A partir del anterior límite superior y hasta un límite lejano la política adecuada al productor es al 15 por ciento

7. CONCLUSIONES

1. La simulación matemática diaria del crecimiento de los cultivos es un avance al conocimiento del valor de las variables que representan internamente al sistema (contenidos de humedad y concentración salina del extracto de saturación del suelo), así como de su dinámica, para no sólo permitir reproducir fidedignamente su rendimiento pasado, con fines de establecer orientaciones futuras, como también para observar su proceso de desarrollo e intervenir en éste de acuerdo a objetivos previamente establecidos.

2. El campo de aplicación del modelo está limitado a la consideración de los efectos de las variables representadas (agua-sales-fertilizantes) y a su interacción, y no es aplicable donde ocurran efectos adicionales sobre la producción, como pueden ser las plagas, restricciones a la oxigenación de las raíces, cambios bruscos en la temperatura del suelo, etc.
3. El empleo de relación que determina el rendimiento relativo del cultivo en función de su transpiración permite considerar la cantidad de agua, que entra al perfil de simulación del suelo, que efectivamente contribuye para la composición del rendimiento.
4. Para el funcionamiento adecuado del modelo se requiere por lo menos la determinación precisa del rendimiento máximo que se puede obtener bajo las condiciones en que se realiza el cultivo. Experimentos realizados con este objetivo pueden ser extendidos para verificar la interacción del fertilizante con la cantidad de agua que entra superficialmente al perfil del suelo, para observar en las condiciones locales la relevancia de esta interacción.
5. Los resultados obtenidos han permitido concluir por la adecuación de los procedimientos propuestos para incluir el efecto osmótico de las sales disueltas en el agua del suelo, sobre la transpiración y consecuentemente sobre el rendimiento del cultivo.
6. En cuanto a la interacción de las sales con el agua, para un valor fijo de b en la ecuación (4), que representa el límite mínimo de humedad residual del suelo no salinizado a partir del cual la trans

piración del cultivo pasa a ser menor que la transpiración máxima, las sales disueltas en el agua del suelo en ambas localidades de estudio, aunque a bajas concentraciones, influyen sobre el rendimiento simulado. Este efecto es mayor para políticas de aplicación de riego cuando la humedad aprovechable residual del suelo es alta y para políticas de riego a bajos niveles de esta humedad, la limitación de la transpiración, debida exclusivamente a la humedad del suelo, predomina ampliamente en la restricción a la producción. Además, cuanto menor es el valor de b mayor es el efecto relativo de la presión osmótica y vice versa, debido a la forma exponencial de la curva de retención del suelo.

7. En lo que se refiere a la interacción de las sales con la fertilización del suelo, este trabajo se limita a aceptar el planteamiento que recomienda niveles de fertilización del suelo salinizado idéntico al del suelo no salinizado.
8. La redistribución del agua y las sales disueltas ha permitido representar adecuadamente sus respectivos flujos entre capas, tanto en el período de cultivo cuanto en el de descanso. Se ha impuesto un límite para la evaporación mínima diaria, que permite mantener una extracción constante de humedad de la capa superficial de suelo, a pesar de los largos períodos sin lluvia o riego. Para la lámina de redistribución entre capas se ha establecido un límite superior para evitar intercambios bruscos y amortiguar el flujo en situaciones donde se registran fuertes gradientes de tensión.

9. La interacción de los efectos del agua-sales-fertilizantes ha permitido representar de forma satisfactoria el rendimiento cosechado en las dos localidades de estudio, con un coeficiente de determinación no inferior al 85 por ciento para la regresión establecida entre los rendimientos observados con los simulados.
10. El modelo es muy sensible a los valores de α , por lo que para su calibración es de gran importancia la búsqueda del conjunto de valores que proporciona el mejor ajuste de los valores simulados con los observados, lo que se realiza a través del empleo de la ecuación (1), cuando se conoce las transpiraciones real y máxima a cada etapa de crecimiento del cultivo, y el rendimiento máximo.
11. Finalmente, para el precio actual de garantía del maíz y precios bajos para la unidad de volumen de agua entregada en la parcela cultivada, se justifican pequeños incrementos en la productividad, aún con grandes aplicaciones adicionales de agua, y por lo tanto se hacen más redituables las políticas de aplicación de riego a altos niveles de humedad residual en el suelo. A medida que se incrementan los precios del agua se convierten en más redituables las políticas de riego a más bajos niveles de humedad.

B I B L I O G R A F I A

ACEVES N., L.A. (1981) "Los Terrenos Ensalitrados y los Métodos para su recuperación". Universidad Autónoma de Chapingo, Depto. de Suelos. México

ANDERSON, C.K.; L.R. STONE Y L.S. MURPHY (1982) "Corn Yield as Influenced by In-Season Application of Nitrogen With Limited Irrigation" Agronomy Journal. Vol. 74 pp 396-401.

ARON, G; A.C. MILLER, JR. Y D.F. LAKATOS (1977). "Infiltration Formula Based on SCS Curve Number" Jour. Irr. And Drain. Div. ASCE. Vol. 103 pp 419-427.

AYERS, R.S. (1977) "Quality of Water for Irrigation". Jour. Irr. And Drain. Div. ASCE. Vol. 103 pp 135-154

BAUDER, J.W.; R.J. HANKS Y D.W. JAMES (1975) "Crop Production Function Determinations as Influenced by Irrigation and Nitrogen Fertilization Using a Continuous Variable Design". Soil Sci. Soc. Amerc. Proc. Vol. 39 pp 1187-1192.

BERNSTEIN, L.; L.E. FRANCOIS Y R.A. CLARK (1974). "Interactive Effects of Salinity and Fertility on Yields of Grains and Vegetables" Agronomy Journal. Vol. 66. pp 412-421.

BERNSTEIN, L. (1981) "Effects of Salinity and Soil Water Regime on Crop Yields". Cap. 3 en D. Yaron (ed). Salinity in Irrigation and Water Resources. Marcel Dekker Inc. New York and Basel.

BRESLER, E. (1967). "A Model for Tracing Salt Distribution in the Soil Profile and Estimating the Efficient Combination of Water Quality and Quantity Under Varying Field Conditions" Soil Science. Vol. 104. pp 227-233.

BRESLER, E. Y D. YARON (1972) "Soil Water Regime in Economic Evaluation of Salinity in Irrigation" Water Res. Res. Vol. 8. pp 791-800.

BRESLER, E. (1981) "Irrigation and Soil Salinity" Cap. 4 en D. Yaron (ed) Salinity in Irrigation and Water Resources. Marcel Dekker Inc. New York and Basel.

BURT, J.E.; J.T. HAYES; P.A. O'ROURKE; W.H. TERJUNG Y P.E. TODHUNTER. (1981) "A Parametric Crop Water Use Model." Water Res. Res. Vol. 17. pp 1095-1108.

CARLSON, C.W.; J. ALESSI Y R.H. MICKELSON (1959) "Evapotranspiration and Yield of Corn as Influenced by Moisture Level, Nitrogen Fertilization, and Plant Density". Soil Sci. Soc. Proceedings. Vol. 23, pp 242-245.

CHILDS, S.W. Y R.J. HANKS (1975). "Model of Soil Salinity Effects on Crop Growth". Soil Sci. Soc. Amerc. Proc. Vol. 39. pp 617-622.

CHILDS, S.W.; J.R. GILLEY Y W.E. SPLINTER (1977) "A Simplified Model of Corn Growth Under Moisture Stress" Transactions of the ASAE. Vol. 20 pp 858-865.

DAHIYA, I.S.; M. SINGH ; M. SINGH Y S. HAJRASULIHA (1980) "Simultaneous Transport of Surface Applied Salts and Water Through Unsaturated Soils as Affected by Infiltration, Redistribution, and Evaporation". Soil Sci. Soc. Am.J. Vol. 44. pp 223-228.

DENT, J.B. y M.J. BLACKIE (1979) "Systems Simulation in Agriculture"
Applied Science Publishers Ltd. London.

DOORENBOS, J. y A.H. KASSAM (1979) "Yield Response to Water" FAU.
Irrigation and Drainage Paper. Número 33. Roma.

DOORENBOS, J. y W.O. PRUITT (1977). "Crop Water Requirements" FAU.
Irrigation and Drainage Paper Número 24. Roma.

DUMSDAY, R. G. (1971), "Evaluation of Soil Conservation Policies by
Systems Analysis". Cap. 8 en J.B. Dent y J.R. Anderson (ed). Systems Analysis
in Agricultural Management. John Wiley & Sons. New York.

DUTT, G.R.; M.J. SHAFFER y W. J. MOORE (1972). "Computer Simulation
Model of Dynamic Bio-Physicochemical Processes in Soils". Agricultural Expe-
riment Station. University of Arizona, Tucson. Technical Bulletin 196.

EAGLESON, P.S. (1978). "Climate, Soil, and Vegetation. 3: A Simplified
Model of Soil Moisture Movement in the Liquid Phase". Water Res. Res. Vol. 14.
pp 722-730.

FAO (1973) "Irrigation, Drainage and Salinity", An International Source
Book. FAO/UNESCO. Hutchinson/FAO/UNESCO.

FEDDES, R.A.; P.J. KOWALIK y H. ZARADNY (1978) "Simulation of Field
Water Use and Crop Yield" John Willey & Sons. New York - Toronto.

FLINN, J. C. (1971). "The Simulation of Crop-Irrigation Systems" Cap. 7
en J.B. Dent y J. R. Anderson (ed). Systems Analysis in Agricultural Management.
John Wiley & Sons. New York.

- FOLLET, R.F.; E.J. DOERING; G.A. REICHMAN Y L.C. BENZ (1974). "Effect of Irrigation and Water-Table Depth on Crop Yields". Agronomy Journal. Vol. 66. pp 304-308.
- FRENCH, B.L. (1956) "Functional Relationships for Irrigated Corn Response to Irrigation". Jour. Farm Economy. Vol. 38. pp 736-747.
- FREYBERG, D.L.; J.W. REEDER; J.B. FRANZINI E I. REMSON (1980). "Application of the Green Ampt Model to Infiltration Under Time-Dependent Surface Water Depths". Water Res. Res. Vol. 16. pp 517-528.
- GILLEY, J.R.; D.L. MARTIN Y W.E. SPLINTER. (1980). "Application of a Simulation Model of Corn Growth to Irrigation Management Decisions" in D. Yaron y C. Tapieros (ed). Operations Research in Agriculture and Water Resources. North-Holland Publ. Co.
- GREACEN, E.L. (1977). "Mechanisms and Models of Water Transfer". Cap. 8 en J.S. Rusell y E.L. Greacen (ed). "Soil Factors in Crop Production in a Semi-Arid Environment". University of Queensland Press, in Association with the Australian Society of Soil Science Incorporated.
- HANKS, R.J. (1974). "Model for Predicting Plant Yield as Influenced by Water Use". Agronomy Journal. Vol. 66. pp 660-665.
- HANKS, R.J. Y R.W. HILL (1980). "Modeling Crop Responses to Irrigation" International Irrigation Information Center. Pergamon Press Inc.
- HANWAY, J.J. (1963) "Growth Stages of Corn (Zea Mays L.)". Agronomy J. Vol. 55. pp 487-492.

HUSZAR, P.C., M.D. SKOLD Y R.E. DANIELSON (1970). "Evaluation of Irrigation Water and Nitrogen Fertilizer in Corn Production" Colorado State University at Fort Collins. Experiment Station Tech. Bull. 107.

JENSEN, D. Y J. PESEK (1959 A). "Generalization of Yield Equations in Two or More Variables: I. Theoretical Considerations". Agronomy Journal. Vol. 51. pp 252-259.

JENSEN, D. Y J. PESEK. (1959 B). "Generalization of Yield Equations in Two or More Variables: II Application to Yield Data" Agronomy Journal. Vol. 51. pp. 259-263.

JURINACK, J.J. Y R.J. WAGENET (1981) "Fertilization and Salinity" Cap. 5 en D. Yaron (ed). Salinity in Irrigation and Water Resources. Marcel Dekker Inc. New York and Basel.

LUNIN, J. Y M. H. GALLATIN (1965 A). "Salinity-Fertility Interactions in Relation to the Growth and Composition of Beans. I. Effect of N, P, and K". Agronomy Journal Vol. 57. pp 339-342.

LUNIN, J. Y M. H. GALLATIN (1965 B) "Salinity-Fertility Interactions in Relation to the Growth and Composition of Beans. II. Varying Levels of N. and P". Agronomy Journal. Vol. 57. pp 342-345.

MAAS, E.V. Y G.J. HOFFMAN (1977). "Crop Salt Tolerance-Current Assessment" Jour. Irr. and Drain. Div. ASCE. Vol. 103. pp 115-134.

MCNEAL, B.L. (1981). "Evaluation and Clasification of Water Quality for Irrigation". Cap. 2 en D. Yaron (ed). Salinity in Irritation and Water Resources. Marcel Dekker Inc. New York and Basel.

MOLZ, F. J. (1981). "Models of Water Transport in the Soil Plant Systems: A review". Water Res. Res. Vol. 17. pp 1245-1260.

MOMBIELA, F.A. Y L. A. NELSON (1981). "Relationships Some Biological and Empirical Fertilizer Response Models and Use of the Power Family of Transformations to Identify an Appropriate Model". Agronomy Journal. Vol. 73. pp 353-356.

MOMBIELA, F.A.; J.H. NICHOLAIDES, III, Y L.A. NELSON (1981). "A Method to Determine the Appropriate Mathematical Form for Incorporating Soil Test Levels in Fertilizer Response Models for Recommendation Purposes". Agronomy Journal. Vol. 73. pp 937-941.

MORENO RUBIO, A. (SD). "Función de Producción y Número de Riegos en Etapas Fenológicas en Maíz de Grano. (Zea Mays)" (mimeo).

MUSICK, J.T.; D. W. GUINES Y G.M. HERRON (1963) "Irrigation Water Management and Nitrogen Fertilization of Grain Sorghums". Agronomy Journal. Vol. 55. pp 295-298.

NIMAH, M.N. Y R.J. HANKS (1973 A). "Model for Estimating Soil Water, Plant, and Atmospheric Interrelations: I. Description and Sensitivity" Soil Sci. Soc. Amerc. Proc. Vol. 37. pp 522-527.

NIMAH, M.N. Y R.J. HANKS (1973 B). "Model for Estimating Soil Water, Plant, and Atmospheric Interrelations: II. Field Test of Model". Soil Sci. Soc. Amerc. Proc. Vol. 37. pp 528-532

OLAIZ Y PEREZ, A. (1977). "Precios del Agua en Irrigación. Primera Parte". Documento No. 18 de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.

ORTEGA GIL, G.E.; P. RIEMAN R.; C. SANCHEZ M. Y J.L. SANCHEZ B. (1974). "Análisis de Precipitación y Escurrimiento para Establecer Criterios de Diseño para el Desarrollo de Cultivos de Temporal Eficientes". Instituto de Ingeniería, UNAM.

PARKES, M.E. Y J.R. O'CALLAGHAN (1980) "Modeling Soil Water Changes in a Well-Structured, Freely Draining Soil". Water Res. Res. Vol. 16. pp 755-761.

PINEDA M., J. R. (1980) "La Dinámica del Nitrógeno en el Suelo y el Balance Nitrogenado Suelo-Planta, Bajo Cultivo de Maíz (Zea Mays)". Tesis Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados de Chapingo. Chapingo. México.

ROBERTO, S.; W.H. WEAVER Y J.P. PHELPS (1980) "Use of the Nitrate Soil Test to Predict Sweet Corn Response to Nitrogen Fertilization". Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 44. pp 306-308.

SANCHEZ B., J. L. (1975). "Planning of Irrigation Systems for Agriculture with the Aid of a Simulation Model" Proceedings Second World Congress, International Water Resources Association, New Delhi, India, December 1975; Volume I pp 247-252.

SANCHEZ B., J.L.; J. GRACIA S. Y J.E. ARJONA O. (1978) "Calibración de un Modelo Matemático para Determinar las Necesidades de Agua de un Cultivo". Instituto de Ingeniería, UNAM.

SANCHEZ B., J. L.; J. GRACIA S.; A. BERTADO F.; B. CADENA C.; C. SOLIS G. Y V. RUIZ (1980). "Manual para la Evaluación, Diseño Preliminar y Rehabilitación de Zonas de Riego". Instituto de Ingeniería, UNAM.

SARH. SUBSECRETARIA DE AGRICULTURA Y OPERACION, DIRECCION GENERAL DE DISTRITOS Y UNIDADES DE RIEGO. (1978 A). "Características de Distritos y Unidades de Riego. Tomo I. Region Noroeste. Centro-Norte".

SARH. SUBSECRETARIA DE AGRICULTURA Y OPERACION, DIRECCION GENERAL DE DISTRITOS Y UNIDADES DE RIEGO (1978 B). "Características de Distritos y Unidades de Riego. Tomo II. Región Noreste. Centro II-Sureste".

SARH. DIRECCION GENERAL DE DISTRITOS Y UNIDADES DE RIEGO, DISTRITO DE RIEGO No. 003 - TULA, HGO. (1980) "Respuesta del Maíz a Diferentes Tensiones de Humedad en el Suelo Considerando dos Etapas Fenológicas".

SARH. SUBSECRETARIA DE AGRICULTURA Y OPERACION, DIRECCION GENERAL DE ECONOMIA AGRICOLA (1982). "Determinación de los Precios de Garantía para los Productos del Campo". Econotecnia Agrícola. Vol. 6, No. 11.

SMILES, D.E. (1977). "Air-Water-Heat Relationships" Cap. 4 en J.S. Russell y E. L. Greacen (ed). Soil Factors in Crop Production in a Semi-Arid Environment. University of Queensland Press, in Association with the Australian Society of Soil Science Incorporated.

SRH. - SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS (1970). "Proyecto de Zonas de Riego"

STUFF, R.G. Y R.F. DALE (1978). "A Soil Moisture Budget Model Accounting for Shallow Water Table Influences" Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 42, pp 637-643.

TSCHESCHKE, P.D. Y J.R. GILLEY (1979). "Status and Verification of Nebraska's Corn Growth Model- CORNGRO". Transactions of the ASAE. Vol. 22. pp 1329-1337.

VIETS, JR., F. G. (1967). "Nutrient Availability in Relations to Soil Water" Cap. 24 en R.M. Hagan, H. R. Haise y T.W. Edminster (ed). Irrigation of Agricultural Lands. American Society of Agronomy, Number 11, Madison, Wisconsin.

VOSS, R. Y J. PESEK (1962). "Estimation of Effect Coefficients Relating Soil Test Values and Units of Added Fertilizer". Agronomy Journal. Vol. 54, pp 339-341.

WAGNET, R. J.; W.F. CABBELL; A.M. BAMATRAF Y D. L. TURNER (1980). "Salinity, Irrigation Frequency, and Fertilization Effects on Barley Growth" Agronomy Journal. Vol. 72 pp 969-974.

WARRICK, A.W.; J.W. BIGGAR Y D.R. NIELSEN (1971). "Simultaneous Solute and Water Transfer for an Unsaturated Soil" Water Res. Res. Vol. 7. pp. 1216-1225.

WILLIAMSON, R.E. Y G.J. KRIZ (1970). "Response of Agricultural Crops to Flooding, Depth of Water Table and Soil Gaseous Composition". Transactions of the ASAE, Vol. 13 pp 216-220.

YARON, D.; H. BIELORAI; J. SHALHEVET Y Y. GAVISH. (1972).
"Estimation Procedures for Response Functions of Crops to Soil Water Content
and Salinity" Water Res. Res. Vol. 8. pp 291-300.

YARON, D.; E. BRESLER; H. BIELORAI Y B. HARPINIST (1980). "A
Model for Optimal Irrigation Scheduling With Saline Water" Water Res. Res.
Vol. 16 pp 257-262

ANEXO 1

DESCRIPCION DE LOS DATOS DE ENTRADA AL MODELO

Se describen los datos de entrada al modelo de acuerdo a la secuencia de su lectura y de conformidad con el programa en lenguaje FORTRAN que se presenta en el Anexo III.

1) SITIO (I)

SITIO(I) es el título/nombre de la localidad en estudio.

2) IANO, INF, NDC, IPS, IL, M, JS, JFIN, MESC1, IDIAC1, MESC2, IDIAC2, PRRM1.

IANO es el año en que se inicia la simulación

INF es cero cuando el nivel freático no influye en el balance de agua y sales en la zona radicular. En caso contrario INF vale uno.

NDC es el número de capas de suelo, de espesor DELTAX, que se involucra en la simulación. Cuando INF vale cero NDC corresponde al número de capas suficiente para contener la profundidad radicular máxima. Si INF vale uno, NDC corresponde a la profundidad del nivel freático (un valor múltiple de DELTAX), cuya variabilidad se considera bajo la forma de lecturas periódicas.

IPS es la duración del período de simulación en años.

- IL es la clave para impresión de los datos diarios. Si IL es diferente de cero éstos se imprimen.
- M es la clave que indica si el modelo realiza calibración ($M = 1$) o previsión ($M = 2$) del rendimiento.
- JS es el numeral que corresponde al día en que se siembra.
- JFIN es el numeral que corresponde al último día de simulación del primer año, o el día siguiente a la cosecha si se representa únicamente la duración del ciclo de cultivo.
- MESC1 es el mes a partir del cual se recomienda la siembra.
- IDIAC1 es el día del MESC1 a partir del cual se recomienda la siembra.
- MESC2 es el mes límite para sembrar sin reducción del rendimiento máximo obtenible.
- IDIAC2 es el día del MESC2 para sembrar sin reducción del rendimiento máximo obtenible.
- PRRM1 es el porcentaje de reducción del rendimiento máximo obtenible, para cada día de retraso en sembrar el cultivo.
- 3) VL(I), TL(I), MEP, ITOD1, ICAL, IBC, DELTAX.
- VL(I) son los límites correspondientes a los valores de b (ecuación (4)), para cada una de las etapas fenológicas I de desarrollo del cultivo.
- TL(I) cuando el modelo está en el modo de previsión del rendimiento ($M = 2$), para una política de riego dada, los valores de TL(I) son los límites de humedad aprovechable residual mínima en la capa superficial del suelo, a cada etapa fenológica

I de desarrollo del cultivo, que al ser rebasados por primera vez hacen con que el modelo simule la aplicación de un riego que lleva hasta la capacidad de campo un perfil de suelo con espesor igual al de la profundidad radicular máxima. Si el modelo está en el modo de calibración ($M = 1$), estos valores no intervienen en la simulación.

MEP es la clave del modelo empleado para la obtención del rendimiento máximo YM. Si MEP es cero se emplea el de Mitscherlich y si es uno el polinomial.

ITOD1 es la clave del procedimiento empleado para determinar la duración de las etapas fenológicas del cultivo. Si es igual a cero se hace las lecturas de la temperatura de referencia (TR1) y del número de grados-día acumulados, necesarios para concluir cada etapa de su desarrollo. Si es diferente de cero se hace la lectura del número de días acumulados necesarios para concluir cada una de estas etapas.

ICAL es la clave del modo de calibración del modelo. Si es igual a cero se hace las lecturas de los días de aplicación y respectivas láminas de riego. Si es uno la lectura es solamente de los días de riego, con la lámina calculada por el modelo como la necesaria para llevar hasta la capacidad de campo un espesor de suelo igual a la profundidad radicular máxima.

IBC es el indicador del uso del suelo. Si es uno se cultiva en el primer año de simulación y si es cero el suelo permanece en descanso lo que resta de este año.

DELTA_X es el espesor de cada capa de suelo, en cm.

4) CHSAT (I)

CHSAT (I) es el contenido de humedad del suelo en la saturación, en porcentaje del peso seco, en cada una de las capas I.

5) LAD (I, JS-1)

LAD (I, JS-1)

es el valor (inicial) de la lámina de agua disponible en el suelo para el cultivo, en cada una de las capas I, en cm., en el día anterior al primero de simulación, aquí considerado como el de la siembra.

6) CIAST (I, JS-1)

CIAST (I-JS-1)

es el valor (inicial) de la concentración de sales en el suelo, relativa a la saturación, en cada una de las capas I, en meq/litro, en el día anterior al primero de simulación.

7) DA (I)

DA(I) es la densidad aparente de cada una de las I capas de suelo, en g/cm³.

8) CCH (I)

CCH(I) es el contenido de humedad del suelo en la capacidad de campo, en porcentaje del peso seco, en cada una de las capas I.

- 9) PMP (I)
PMP (I) es el contenido de humedad del suelo en el punto de marchitamiento permanente, en porciento del peso seco, en cada una de las capas I.
- 10) U, C1, C2
sólo se leen cuando MEP es cero
U es el rendimiento máximo asintótico
C1 es la eficiencia del fertilizante nitrogenado
C2 es la eficiencia del fertilizante fosfatado.
- 11) A1, A2, A3, A4, A5, A6
sólo se leen cuando MEP es uno
A1,...,A6 son los coeficientes de la regresión entre el rendimiento y los fertilizantes.
- 12) TR1, NETAP1, GD11, GD12, GD13, GD14, GD15
sólo se leen cuando ITOD1 es cero
TR1 es la temperatura de referencia, en °C, a partir de la cual se acumulan los grados-día
NETAP1 es el número de etapas fenológicas en que se subdivide el ciclo de cultivo
GD11,...,GD15 son los números de grados-día acumulados, necesarios para que concluyan las etapas 1,...,5.

13) NETAP1, JJ11, JJ12, JJ13, JJ14, JJ15

sólo se leen si ITOD1 es diferente de cero.

NETAP1 es el número de etapas fenológicas en que se subdivide el ciclo de cultivo.

JJ11, ..., JJ15

son los números de días acumulados, necesarios para que concluyan las etapas 1, ..., 5,

14) N, C, COND1, COND3

N es el número de escurrimiento

C es la concentración salina del agua de riego, en meq/litro

COND1, COND3

son factores multiplicadores del número de escurrimiento en función de la lluvia del día antecedente.

15) CC1 (I)

CC1(I) son los coeficientes de cultivo a cada 5 por ciento de la duración del ciclo de cultivo.

16) PM1, RD1, COND

PM1 es la profundidad máxima del sistema radicular, en cm

RD1 es el número de días que tarda el sistema radicular para alcanzar la profundidad máxima.

COND es el valor representativo de la conductividad hidráulica del suelo, en cm/día.

17) AA, BB, DD

AA, BB, DD son coeficientes de la regresión entre el rendimiento, la fertilización con nitrógeno y la humedad del suelo.

18) AL11, AL12, AL13, AL14, AL15

AL11, ..., AL15

son los pesos empíricos que representan la importancia de la relación entre la transpiración real y la transpiración máxima del cultivo, en cada una de las etapas de su desarrollo (valores de α)

Se repite la lectura del siguiente conjunto de tarjetas para cada año (período) de simulación.

19) JIN, JFIN

JIN es el día en que se inicia la simulación

JFIN es el último día de simulación

20) TEMP(J)

sólo se lee si ITOD1 es cero

TEMP(J) es el valor de la temperatura máxima del día J. en °C.

21) IX1, ID1, IX2, ID2

IX1 es la dosis de fertilizante nitrogenado aplicable al suelo, en kg/ha.

ID1 es la dosis de fertilizante fosfatado aplicado al suelo, en kg/ha.

- IX2 es la dosis de fertilizante nitrogenado residual en el suelo, al inicio del ciclo de cultivo y antes de la nueva aplicación de fertilizante, en kg/ha.
- ID2 es la dosis de fertilizante fosfatado residual en el suelo, al inicio del ciclo de cultivo y antes de la nueva aplicacación de fertilizante, en kg/ha.
- 22) NDEL(J) sólo se lee si INF vale uno
- NDEL(J) es el número de capas de espesor DELTAX que se simula en el día J. Corresponde a la profundidad del nivel freático expresado a través de un número múltiple de DELTAX. De un día al otro no puede cambiar en más de una unidad y cuando su valor es cero significa que no ha cambiado desde su última lectura.
- 23) CSALNF sólo se lee si INF vale uno
- CSALNF es la concentración salina del agua del manto freático, en meq/litro.
- 24) PP(J)
- PP(J) es el valor del total precipitado en el día J, en mm.
- 25) EO(J)
- EO(J) es la lámina de evaporación del día J, en mm.

- 26) NR
sólo se lee si M es uno
NR es el número de riegos aplicados en todo el ciclo del cultivo.
- 27) J, LR(J)
sólo se lee si M es uno e ICAL es cero
J (en este caso) es un día de la simulación en que ocurre un riego.
LR(J) es la lámina de riego del día J. en cm.
- 28) IIJ(K)
sólo se lee si M es uno e ICAL es uno
IIJ(K) es el día en que ocurre el riego K

A N E X O I I**DESCRIPCION DEL PROGRAMA DE SIMULACION****1) PROGRAMA PRINCIPAL**

El programa inicia con la lectura de los datos generales correspondientes a las tarjetas del 1 al 18 y calcula las láminas de agua que el suelo puede almacenar entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente, a la saturación, y la diferencia entre la almacenable en el punto de marchitamiento permanente con la que el suelo almacena cuando es seco en presencia de la humedad atmosférica.

"PAR" es la primera subrutina a ser llamada, con el objetivo de calcular los parámetros que definen la curva de retención de agua en cada una de las capas del suelo, en función de sus constantes de humedad.

Empieza la periodicidad anual con la lectura de las demás tarjetas, correspondientes al primer ciclo y se inicia la simulación a nivel diario. Lo que se describe a continuación se repite por el número de años correspondientes al período de simulación (IPS).

De acuerdo a la frontera inferior del sistema se define el número de capas de suelo (NDC), de espesor DELTAX, que serán simuladas. A continua

II.2

ción, para iniciar un determinado día de simulación se hace la lámina de agua disponible, en cada una de las capas de suelo (LAD) igual a la lámina disponible al final del día anterior. Este procedimiento se aplica igualmente para la concentración salina del extracto de saturación de cada una de las capas de suelo (CI_{AST}).

Al seguir, el programa define la fecha correspondiente al día que se simula y si en el primer año todavía se permite cultivar ($IBC = 1$), se compara esta fecha con la definida para la siembra, así como con los límites apropiados para su realización. Si la fecha de simulación es anterior a la fecha de siembra el suelo permanece en descanso. Cuando la fecha de simulación coincide con la de siembra se evalúa su adecuación con respecto al período considerado apropiado para realizarla. Si es anterior a este período se emite un aviso y se interrumpe la simulación. Si la fecha de simulación está contenida en el intervalo apropiado se realiza la siembra y se calcula el rendimiento máximo obtenible. Cuando se siembra en fecha posterior al intervalo apropiado, el rendimiento máximo, que se calcula a través de la subrutina RM, sufre reducción por el retraso en sembrar.

Por otro lado, si IBC es cero el suelo permanece en descanso (o vuelve a este estado si el día anterior corresponde al de la cosecha), hasta que se inicie otro año y se repita el procedimiento que evalúa la posibilidad de realizar nueva siembra.

A partir del día de la siembra, si ITOD1 es igual a cero, empieza la acumulación de grados-día para determinar la duración, en días, de cada una de las etapas de desarrollo del cultivo. Si ITOD1 es diferente de

cero estas duraciones son conocidas y el modelo verifica, en ambos casos, si el suelo continua cultivado.

El modelo realiza el balance de agua y sales, estea el suelo cultivado o en descanso. Si en el día simulado ocurre una precipitación (PP), se calcula la lámina infiltrable (LI) a través de la subrutina "INFIL".

Si en el día anterior al que se considera no ocurrió lluvia ni se aplicó riego, entonces el valor de KKK, que corresponde al número de días consecutivos sin lluvia o riego, es incrementado en una unidad y a través de la subrutina "EVAPO" se calcula la evaporación del suelo en este día (E), así como la transpiración máxima (TM) a que estará sujeto el cultivo cuando el suelo no esté en descanso. A la lámina de agua disponible (LAD) en la capa superior del suelo se resta la lámina correspondiente a la evaporación (E).

Si el suelo está cultivado se calcula la transpiración (T) a través de la subrutina "TRANSP", donde se resta esta lámina a las LAD de las respectivas capas en que se extrajeron.

Se hace con que la precipitación y/o el riego ocurran al final del día, esto es, después de haber restado las láminas correspondientes a la evaporación y a la transpiración. La redistribución y balance de sales en el suelo se efectúan a través de la subrutina "BALSAL".

Cuando concluye el ciclo de cultivo el modelo calcula el rendimiento simulado (Y) que requiere el conocimiento, a cada etapa de desarrollo del cultivo, de la suma de las láminas diarias de transpiración del cultivo (ST), así como de las láminas diarias de transpiración máxima

(STM). El rendimiento máximo obtenible (YM) para la condición dada de fertilización, además de multiplicado por el producto de la división de ST por STM elevada a un exponente que representa la importancia de esta relación en cada etapa de desarrollo del cultivo (AL11,...,AL15), se multiplica por un factor que representa la eficiencia promedio de aplicación del nitrógeno (EPAN), para la obtención del rendimiento simulado (Y).

Las láminas de agua que se emplean para la determinación de EPAN corresponden, para el rendimiento observado, a la suma de la evaporación (E) con la transpiración (T), simuladas en todo el ciclo del cultivo y, para el rendimiento máximo, la correspondiente suma de la evapotranspiración máxima (ETM), obtenida a través del producto de la evaporación corregida de tanque clase A, (EO), multiplicado por el coeficiente de cultivo que corresponde al porcentaje de desarrollo en que se realiza el cálculo de ETM (CC1).

Al concluir el ciclo de cultivo se hace IBC igual a cero para que el suelo ingrese a nuevo ciclo de descanso y nueva siembra sólo se realice en el siguiente año. Asimismo, se imprimen resultados a nivel diario (si IL es diferente de cero), por etapa fisiológica y el rendimiento simulado.

2) SUBROUTINA PAR (NDC, DELTAX, CCH, PMP, CHSAT, XK, XN, CT)

Esta subrutina permite el cálculo de los parámetros de la curva de retención de agua en cada una de las capas del suelo (XK, XN, CT), en función de sus contenidos de humedad característicos (PMP, CCH y CHSAT).

- 3) SUBROUTINA RM (MOP, FRRM, U, C1, C2, IX1, IX2, ID1, ID2, A1, A2, A3, A4, A5, A6, REN)

Esta subrutina determina, en función del valor de MOP, el rendimiento máximo obtenible (YM) a través del modelo de Mitscherlich (MOP = 0) ó del polinomial (MOP = 1). Además, el valor de YM es multiplicado por el factor de reducción del rendimiento máximo (FRRM), determinado en el programa principal, el cual es función del número de días de retraso con respecto a la fecha límite posterior del período considerado adecuado para la siembra. Sin embargo, si la siembra se efectúa en el período adecuado FRRM vale uno.

El modelo supone el uso de las mismas fórmulas fertilizantes a lo largo de todo el período de simulación y una lectura a cada ciclo de cultivo de los nutrientes, tanto de las cantidades aplicadas como de las residuales en el suelo.

Otras suposiciones, implícitas, se refieren a la identidad de la variedad empleada para la obtención del rendimiento máximo, con la cultivada a nivel productivo; del suelo cultivado (textura, estructura, granulometría, profundidad, etc.) y de la localización geográfica para ambas determinaciones.

- 4) SUBROUTINA INFIL (J, N, COND1, COND3, JULI, PP, LI)

De acuerdo a la precipitación del día antecedente, el número de escurrimiento (N) y la precipitación (PP) ocurrida en un determinado día, esta subrutina permite el cálculo de la lámina infiltrable (LI).

- 5) SUBROUTINA EVAPO (J, JJ, ITOD1, TEMPAC, GD15, JJ15, KKK, CC1, JULI, HATM, EO, LAD, TM, E, ETM).

En esta subrutina se calcula la lámina que se evapora de la superficie del suelo (E) y se la resta de la lámina de agua disponible (LAD) en la capa superficial. El valor de LAD en esta capa puede bajar hasta la lámina mínima almacenable cuando se seca en presencia de la humedad contenida en la atmósfera (HATM) y la menor lámina de evaporación diaria es de 0.01 cm.

Cuando se cultiva, esta subrutina también calcula el valor de la transpiración máxima (TM) a que está sujeto el cultivo, además de calcular la evapotranspiración máxima (ETM), para efecto del cálculo de la eficiencia promedio de aplicación de nitrógeno (EPAN).

- 6) SUBROUTINA TRANSP (J, JJ, VL, NDC, VAST, PM1, RD1, DELTAX, TM, AD, ETAP, C1AST, DA, PMP, XK, XN, CT, LAD, T, PR1).

Conocida la distribución radicular del cultivo, esta subrutina calcula la profundidad (PR1) alcanzada en el día de simulación, la cual no puede ser mayor que la máxima profundidad de simulación.

Con las láminas de agua disponibles en cada capa de suelo (LAD), a través de cada una de sus respectivas curvas de retención de agua se calculan las tensiones (TS), que representan únicamente el esfuerzo debido al contenido de humedad. Estas tensiones son determinadas a través de la subrutina "TENSU". A estas tensiones se incrementa el valor correspondiente a la presión osmótica, con la concentración de sales referida

a la LAD en el suelo, incluso después de haber sido restada la evaporación diaria.

Cabe aclarar que por razones computacionales tanto las tensiones como las presiones tienen asignados signos positivos.

Con las nuevas tensiones del suelo, que incluyen la presión osmótica, se obtienen láminas ficticias de agua disponible en el suelo (PAD) a través de la subrutina "SUTEN" y son estas láminas las empleadas para el cálculo de la transpiración (T) del cultivo.

El procedimiento para determinar el total transpirado, así como las capas donde se extrae tal lámina, obedece a la siguiente secuencia:

- a) Dentro de las capas que contienen raíces se busca la que tiene mayor porcentaje de humedad aprovechable.
- b) Si esta capa contiene un porcentaje de humedad aprovechable igual o superior al valor de b (ecuación (4), ver texto), toda la transpiración (T) del cultivo es extraída de esta capa y es igual a la transpiración máxima (TM).
- c) Si la capa con mayor contenido de humedad aprovechable tiene un porcentaje de ésta inferior al valor de b, la lámina extraída por concepto de transpiración, de esta capa, es proporcional a su contenido de humedad.
- d) La lámina T se resta a la LAD de la capa correspondiente.
- e) Si ocurre c (y no b), entonces se busca, en la medida de lo posible, completar el requerimiento de TM del cultivo, repitiéndose el procedimiento de a a d con el nuevo valor de TM igual al original menos la cantidad determinada en c.

II.8

Si ocurre b la transpiración del cultivo será la máxima, pero si ocurre c su transpiración será forzosamente inferior a la máxima.

La repetición mencionada en e, cuando sea necesaria y posible, es realizada únicamente una vez más.

- 7) SUBROUTINA TENSU (J, NDC, DELTAX, DA, PMP, XK, XN, CT, LAD, TS).

Las tensiones en el suelo (TS), debidas exclusivamente a la humedad contenida en cada una de las capas, son determinadas a través de esta subrutina. Para esto se requiere el conocimiento de los parámetros de la curva de retención (XK, XN, y CT), calculados a través de la subrutina "PAR"

- 8) SUBROUTINA SUTEN (J, NDC, DELTAX, DA, PMP, XK, XN, CT, TS, LAD).

Esta subrutina es la inversa de la anterior, calculando las láminas de agua disponibles en cada capa de suelo, en función de la tensión total que el cultivo necesita contraponer para poder extraer agua del suelo.

Esta ha sido empleada únicamente en la subrutina "TRANSP" para obtener la lámina de agua disponible ficticia (PAD), que representa la lámina de agua que estaría disponible en el suelo si la tensión total fuera la suma algebraica de la tensión debida al contenido de humedad, con la presión osmótica debida a la presencia de sales en la capa considerada.

- 9) SUBROUTINA BALSAL (J, JJ, M, NDC, INF, POL, VAST, AD, C, C1AST, LR, LI, CSALNF, JULT, TL, ETAP, DELTAX, COND, DA, PMP, XK, XN, CT, LAD, TS, Z).

Esta subrutina realiza la redistribución de la lámina de infiltración (LI) y de riego (LR) que ingresa superficialmente al perfil del suelo, así como calcula y redistribuye el flujo capilar debido a la diferencia de tensiones de succión entre dos capas contiguas, una de las cuales puede encontrarse en la saturación y representar el nivel freático.

Cuando M es igual a dos, esto es, con el modelo en el modo de previsión del rendimiento, se define la lámina de riego a ser aplicada si el nivel de humedad residual en el suelo ha bajado a niveles inferiores a los permitidos por la política de riego considerada. Cuando M es igual a uno el modelo realiza calibración y las láminas de riego ya fueron leídas o definidas anteriormente, en función del valor de ICAL.

El agua que penetra superficialmente al perfil del suelo hace con que la capa más superficial, cuando la lámina que la penetra es suficiente, se humedezca hasta la capacidad de campo y contenga lámina de agua disponible (LAD) igual a AD.

El excedente percola a la siguiente capa y así sucesivamente hasta que el agua se percole a través de la última de las capas consideradas. Este proceso es interrumpido si en una determinada capa el excedente no es suficiente para humedecerla hasta su respectivo valor de AD, con lo que quedará con un nivel de humedad inferior a la capacidad de campo.

En caso de ocurrir en un mismo día riego y lluvia, las sales contenidas en el agua de riego serán lixiviadas a mayores profundidades, esto es, se considera que primero ocurre el riego.

En función de las características de retención de humedad, cantidad de agua que ingresa y percola a través de la capa, las concentraciones salinas del día anterior y del agua de riego (cuando éste ocurre), se determinan las concentraciones salinas de cada capa de suelo después de lluvia o riego (o los dos).

Es necesario decir que todas las concentraciones empleadas en esta subrutina se refieren al contenido de humedad en el suelo correspondiente a la saturación de la capa considerada. En el caso de la concentración del FLUJO que fluye de una capa a otra (COFLU), se trata de la concentración de una masa líquida calculada en base al contenido de humedad real de la capa de suelo de donde se extrae.

Determinadas las LAD y las correspondientes concentraciones (C1AST) de cada una de las capas del suelo, se inicia el proceso de redistribución debido al flujo capilar.

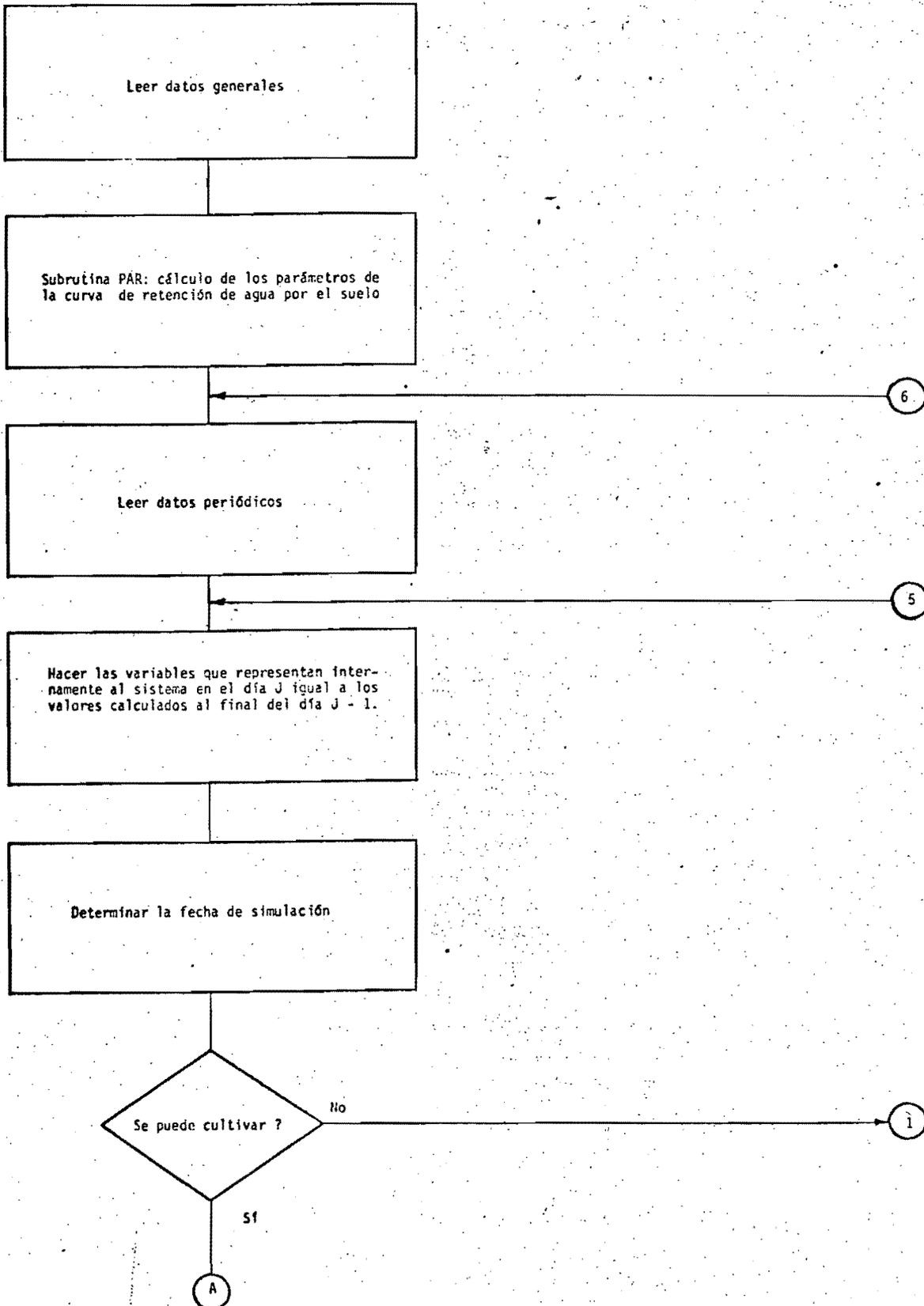
El valor absoluto de este FLUJO se determina a través de la ecuación de Darcy y para esto se emplea un valor de la conductividad hidráulica (COND) que pueda representar esta característica del suelo. Aunque no haya lluvia o riego se efectúa, diariamente, la redistribución debida al flujo capilar, cuyo límite superior es de 0.2 cm.

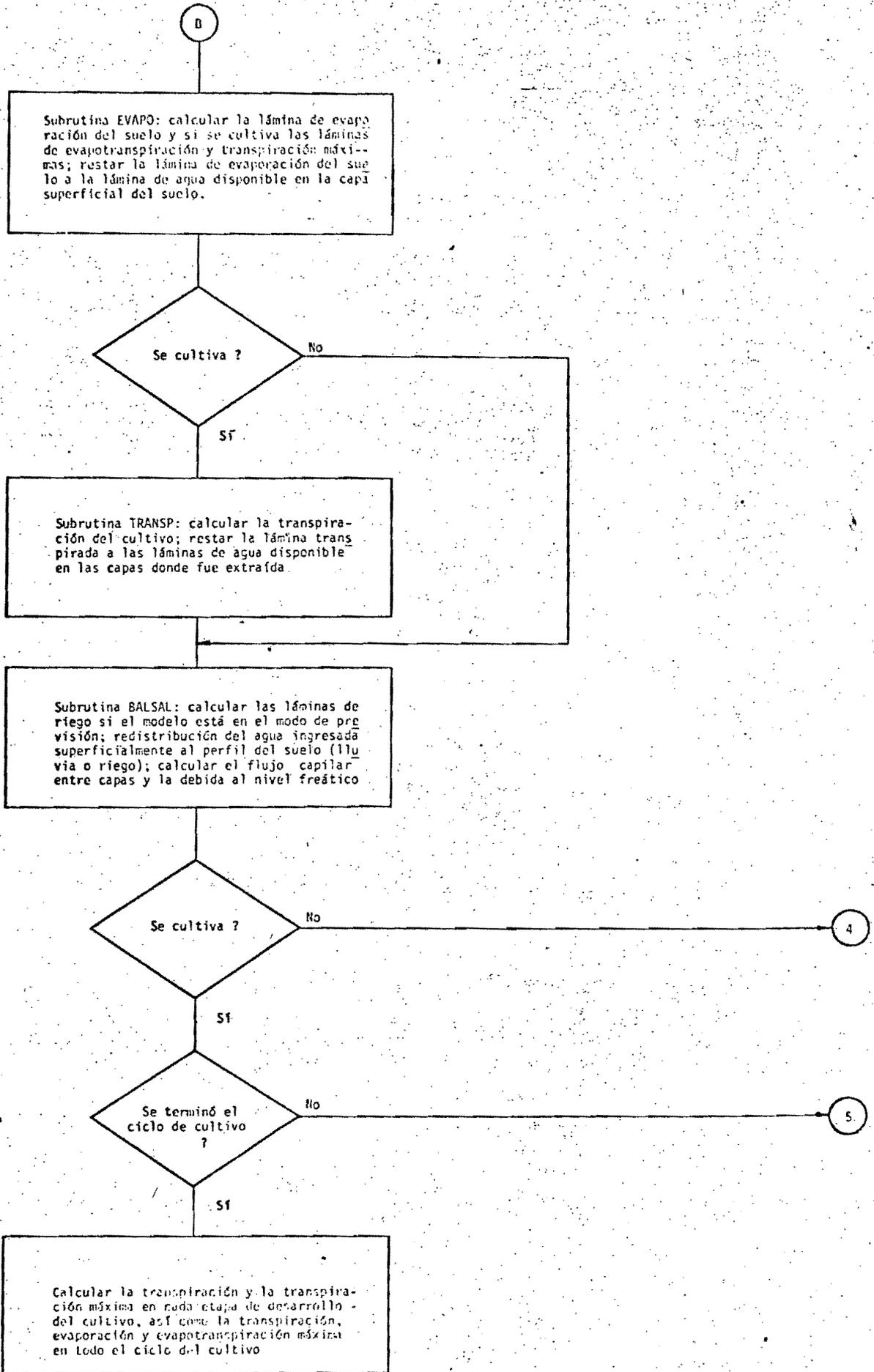
Si INF no es cero hay un nivel freático a una profundidad igual a NDC multiplicado por el espesor DELTAX, de concentración salina CSALNF, que

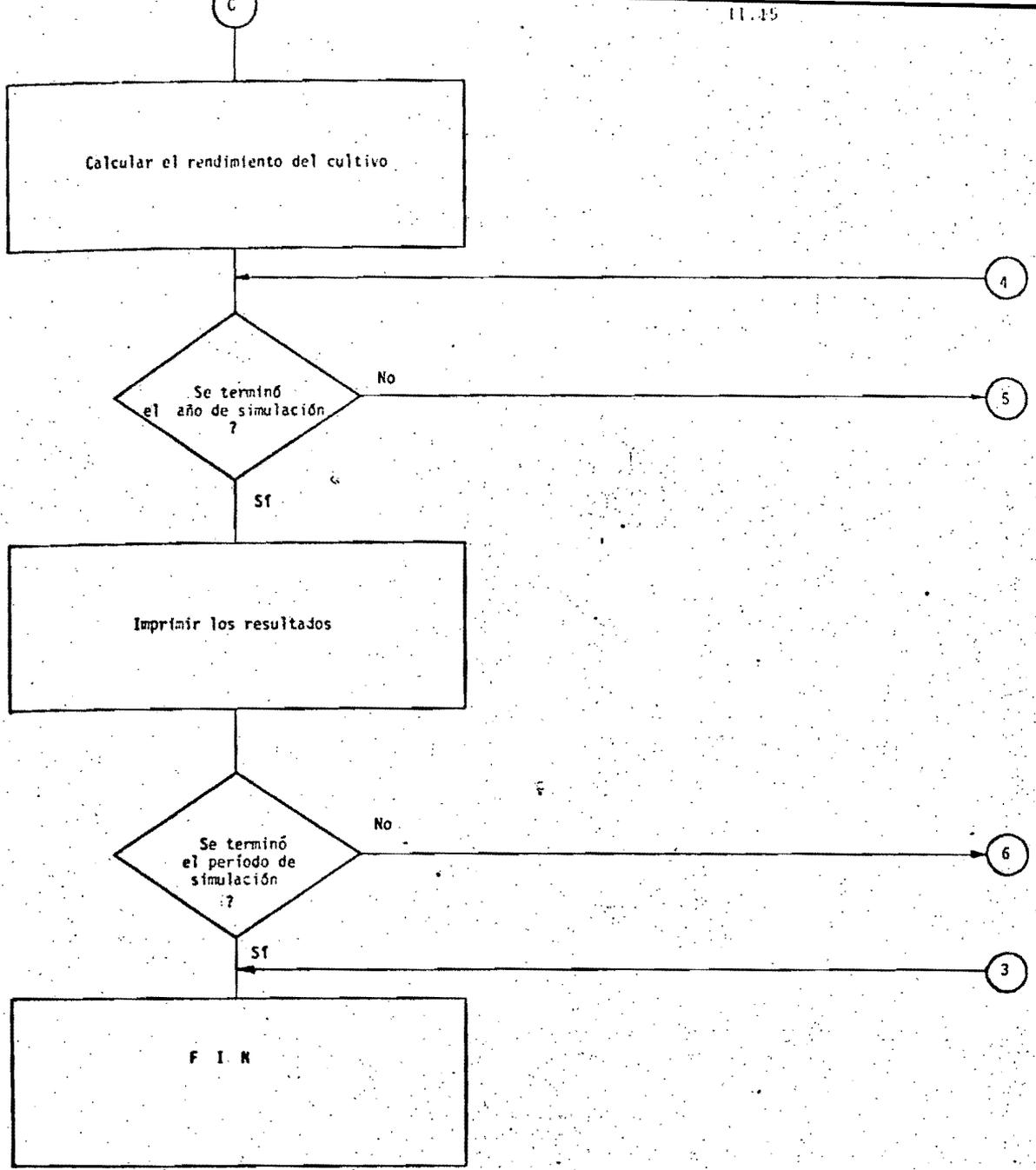
en función de la tensión de succión de la capa inmediatamente superior puede permitir el ingreso de agua y sales al perfil del suelo. La tensión de succión en el nivel freático es cero y se efectúa la redistribución como si éste fuera una capa adicional de concentración salina constante.

Por último, a través de balance de masa se calculan las nuevas concentraciones salinas referidas a la saturación, tanto de la capa que recibe como de la que cede el FLUJO, con su respectiva concentración salina COFLU, además de que a sus respectivos valores de LAD se suma y se resta la lámina correspondiente al FLUJO.

DIAGRAMA DE BLOQUES







ANEXO III
PROGRAMA EN FORTRAN

X*****
 X ESTE PROGRAMA SIMULA EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO EN FUNCION
 XDEL AGUA QUE INGRESA SUPERFICIALMENTE AL SUELO (LLUVIA O RIEGO)
 XDOSIS DE FERTILIZANTE RESIDUAL Y APLICADA AL SUELO (NITROGENO Y
 XFOSFORO) Y CONTENIDO DE SALES EN EL EXTRACTO DE SATURACION DEL
 XSUELO. ADEMÁS, CUANDO EXISTE UN NIVEL FREATICO SOMERO CONSIDERA
 XLA CONTRIBUCION DE AGUA Y SALES A TRAVES DE LA ASCENSION
 XCAPILAR.

X

X LAS PRINCIPALES VARIABLES DEL PROGRAMA SON LAD(I,J) Y
 XCIAST(I,J). LA PRIMERA ES LA LAMINA DE AGUA DISPONIBLE EN EL
 XSUELO PARA EL CULTIVO (POR ARRIBA DE LA ALMACENABLE EN EL PUNTO
 XDE MARCHITAMIENTO PERMANENTE), EN LA CAPA I DEL DIA J, EN
 XCM. LA SEGUNDA ES LA CONCENTRACION SALINA DEL EXTRACTO DE
 XSATURACION DE LA CAPA I DEL DIA J, EN MEQ/LITRO.

X*****

X

DIMENSION A(10),AD(10),CCH(10),CC(20),CH(10),CHSAT(10),CT(10),
 *CIAST(10,366),DA(10),DEF(10),E(366),ETAP(6),ETM(366),EO(366),
 *IIJ(10),LAD(10,366),LI(366),LR(366),NDEL(366),PAD(10,366),PMP(10),
 *PP(366),POR(10),QL(10),SITIO(10),ST(6),STM(6),T(366),TEMP(366),
 *TL(5),TM(366),TS(10,366),V(366),VAST(10),VL(5),XK(10),XN(10),
 *Y1(5),Z(366)

REAL LAD,LI,LR

X*****

XLECTURA DE LOS DATOS GENERALES

X*****

READ(5,1111)(SITIO(I),I=1,10)

```

READ(5,11)IANO,INF,NDC,IPS,IL,M,JS,JFIN,MESC1,IDIAC1,MESC2,IDIAC2,
*PRRM1
  READ(5,21)(VL(I),I=1,5),(TL(I),I=1,5),MEP,ITOD1,ICAL,IBC,DELTAX
READ(5,31)(CHSAT(I),I=1,NDC)
  READ(5,31)(LAD(I,JS=1),I=1,NDC)
  READ(5,31)(CIAS(I,JS=1),I=1,NDC)
READ(5,31)(DA(I),I=1,NDC)
READ(5,31)(CCH(I),I=1,NDC)
READ(5,31)(PMP(I),I=1,NDC)
IF(MEP.NE.0)GO TO 5
READ(5,41)U,C1,C2
GO TO 45
5 READ(5,51)A1,A2,A3,A4,A5,A6
45 IF(ITOD1.NE.0)GO TO 55
READ(5,61)TR1,NETAP1,GD11,GD12,GD13,GD14,GD15
GO TO 85
55 READ(5,71)NETAP1,JJ11,JJ12,JJ13,JJ14,JJ15
85 READ(5,81)N,C,COND1,COND3
READ(5,91)(CC1(I),I=1,20)
  READ(5,101)PM1,RD1,COND
READ(5,111)AA,BB,DD
READ(5,121)AL11,AL12,AL13,AL14,AL15
X*****
X
X KKK ES EL NUMERO DE DIAS CONSECUTIVOS SIN LLUVIA O RIEGO
  KKK=0
X
X JJ ES EL NUMERO DE DIAS TRANSCURRIDOS DESDE LA SIEMBRA

```

JJ=0

%

% II ES EL INDICADOR DEL PRIMER DIA DE SIMULACION

II=1

%

% CALCULO DE LA LAMINA ALMACENABLE A LA CAPACIDAD DE CAMPO (AD) Y

% SATURACION (VAST)

DO 2 I=1,NDC

AD(I)=(CCH(I)-PMP(I))*DELTAX*DA(I)/100.

2 VAST(I)=CHSAT(I)*DELTAX*DA(I)/100.

%

% CALCULO DE LOS PARAMETROS DE LAS CURVAS DE RETENCION DE AGUA,

% POR CAPA

CALL PAR(NDC,DELTAX,CCH,PMP,CHSAT,XK,XN,CT)

CH(1)=(220./XK(1))*(-1./XN(1))

%

% HATM ES EL MENOR VALOR (NEGATIVO) DE LAMINA ALMACENABLE EN LA

% CAPA SUPERFICIAL DEL SUELO

HATM=-1.*(PMP(1)-CH(1))*DA(1)*DELTAX/100.)

WRITE(6,99)

WRITE(6,109)(SITIO(I),I=1,10),(TL(I),I=1,5),(VL(I),I=1,5)

%

% INICIO DE LA SIMULACION DE PERIODICIDAD ANUAL

DO 10000 IA=1,IPS

%

% JULT ES AUXILIAR QUE INDICA EL ULTIMO DIA DEL AÑO QUE SE INICIA

JULT=JFIN

%

% DETERMINACION DEL NUMERO DE DIAS DEL AÑO (NDIA)

W=FLOAT(IANO)/4.-IANO/4

IF(W.NE.0.)NDIA=365

IF(W.EQ.0.)NDIA=366

READ(5,171)JIN,JFIN

%

X *****

X INICIO DE LAS LECTURAS PERIODICAS

X*****

IF(ITOD1.NE.0)GO TO 144

READ(5,131)(TEMP(J),J=JIN,JFIN)

144 WRITE(6,9)

READ(5,141)IX1,ID1,IX2,ID2

IF(INF.EQ.0)GO TO 95

READ(5,151)(NDEL(J),J=JIN,JFIN)

READ(5,151)CSALNF

95 READ(5,181)(PP(J),J=JIN,JFIN)

READ(5,181)(EO(J),J=JIN,JFIN)

IF(M.EQ.2)GO TO 14

READ(5,191)NR

IF(ICAL.EQ.1)GO TO 12

READ(5,201)((J,LR(J)),I=1,NR)

GO TO 14

12READ(5,211)(IIJ(K),K=1,NR)

X*****

X

X INICIO DE LA SIMULACION DIARIA

14 DO 5000 J=JIN,JFIN

X
 X CAMBIO DEL NUMERO DE CAPAS INVOLUCRADAS EN LA SIMULACION EN
 X FUNCION DE LA PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREATICO, CUANDO ESTE
 X EXISTE E INTERFIERE EN LA SIMULACION

```
IF(INF.EQ.0)GO TO 35
IF(NDEL(J).EQ.0)GO TO 35
IF(NDEL(J).GT.NDC)GO TO 24
NDC=NDEL(J)
NU=NDC+1
LAD(NU,J)=VAST(NU)
  C1AST(NU,J)=CSALNF
GO TO 35
24 NDC=NDEL(J)
LAD(NDC,J)=AD(NDC-1)
  C1AST(NDC,J)=CSALNF
35 CONTINUE
```

X

X LAD Y C1AST AL INICIAR EL DIA SON IGUALES AL TERMINO DEL
 X DIA ANTERIOR

```
IF(II.EQ.1.AND.J.EQ.1)GO TO 5000
DO 7 I=1,NDC
  IF(II.NE.1.AND.J.EQ.1)GO TO 3
LAD(I,J)=LAD(I,J-1)
  C1AST(I,J)=C1AST(I,J-1)
GO TO 7
3LAD(I,J)=LAD(I,JULT)
  C1AST(I,J)=C1AST(I,JULT)
7 CONTINUE
```

%

% DETERMINACION DE LA FECHA DE SIMULACION

K=J

IF(K.LE.NDIA)GO TO 10

K=K-NDIA

10 IF(NDIA.EQ.365)GO TO 20

IF(K.LE.31)GO TO 30

IF(K.LE.60)GO TO 40

IF(K.LE.91)GO TO 50

IF(K.LE.121)GO TO 60

IF(K.LE.152)GO TO 70

IF(K.LE.182)GO TO 80

IF(K.LE.213)GO TO 90

IF(K.LE.244)GO TO 100

IF(K.LE.274)GO TO 110

IF(K.LE.305)GO TO 120

IF(K.LE.335)GO TO 130

GO TO 140

20 IF(K.LE.31)GO TO 30

IF(K.LE.59)GO TO 40

IF(K.LE.90)GO TO 170

IF(K.LE.120)GO TO 180

IF(K.LE.151)GO TO 190

IF(K.LE.181)GO TO 200

IF(K.LE.212)GO TO 210

IF(K.LE.243)GO TO 220

IF(K.LE.273)GO TO 230

IF(K.LE.304)GO TO 240

IF(K.LE.334)GO TO 250

GO TO 260

30 IDIA=K

MES=1

GO TO 270

40 IDIA=K-31

MES=2

GO TO 270

50 IDIA=K-60

MES=3

GO TO 270

60 IDIA=K-91

MES=4

GO TO 270

70 IDIA=K-121

MES=5

GO TO 270

80 IDIA=K-152

MES=6

GO TO 270

90 IDIA=K-182

MES=7

GO TO 270

100 IDIA=K-213

MES=8

GO TO 270

110 IDIA=K-244

MES=9

GO TO 270

120 IDIA=K-274

MES=10

GO TO 270

130 IDIA=K-305

MES=11

GO TO 270

140 IDIA=K-335

MES=12

GO TO 270

170 IDIA=K-59

MES=3

GO TO 270

180 IDIA=K-90

MES=4

GO TO 270

190 IDIA=K-120

MES=5

GO TO 270

200 IDIA=K-151

MES=6

GO TO 270

210 IDIA=K-181

MES=7

GO TO 270

220 IDIA=K-212

MES=8

GO TO 270

230 IDIA=K-243

MES=9

GO TO 270

240 IDIA=K-273

MES=10

GO TO 270

250 IDIA=K-304

MES=11

GO TO 270

260 IDIA=K-334

MES=12

270 CONTINUE

X

X INICIALIZACION DE IC , QUE VALDRA UNO CUANDO CONCLUYA EL
X CICLO DEL CULTIVO

IC=0

X

X INICIALIZACION DE ILK , QUE VALDRA UNO CUANDO SEA CONOCIDA
X LA DURACION DE CADA ETAPA DE DESARROLLO DEL CULTIVO

ILK=0

X

X EVALUACION DE LA POSIBILIDAD DE SIEMBRA Y SI ESTA SE REALIZA
X EN PERIODO APROPIADO.

IF(IBC.EQ.0)GO TO 390

IF(IBC.EQ.1.AND.JJ.GT.0)GO TO 360

IF(J.LT.JS)GO TO 390

TEMPAC=0.

IF(MES.LE.MESC1.AND.IDIAL.LT.IDIAC1)GO TO 11000

```
IF(MES.LE.MESC2.AND.IDIA.LE.IDIAC2)GO TO 340
```

```
MESDIF=MES-MESC2
```

```
IF(MESDIF.LT.0)MESDIF=MESDIF+12
```

```
FRRM=1.-PRRM1*(MESDIF*30.+IDIA-IDIAC2)/100.
```

```
GO TO 345
```

```
340 FRRM=1.
```

```
%
```

```
% CALCULO DEL RENDIMIENTO MAXIMO OBTENIBLE EN FUNCION DE LA
```

```
% FERTILIZACION Y DE LA FECHA DE SIEMBRA
```

```
345 CALL RM(MEP,FRRM,U,C1,C2,IX1,IX2,ID1,ID2,A1,A2,A3,A4,A5,A6,REN)
```

```
%
```

```
% INCREMENTO DE UN DIA EN EL PERIODO TRANSCURRIDO DESDE LA
```

```
% SIEMBRA
```

```
360 JJ=JJ+1
```

```
%
```

```
% ACUMULACION DE GRADOS-DIA Y DETERMINACION DEL NUMERO DE DIAS
```

```
% DE DURACION DE CADA ETAPA DE DESARROLLO DEL CULTIVO
```

```
IF(ITOD1.NE.0.AND.ILK.EQ.0)GO TO 370
```

```
IF(ITOD1.NE.0)GO TO 387
```

```
IF(TEMP(J).LT.TR1)TEMP(J)=TR1
```

```
TEMPAC=TEMPAC+TEMP(J)-TR1
```

```
IF(TEMPAC.LE.GD11)ETAP(1)=JJ
```

```
IF(TEMPAC.LE.GD11)GO TO 390
```

```
IF(TEMPAC.LE.GD12)ETAP(2)=JJ
```

```
IF(TEMPAC.LE.GD12)GO TO 390
```

```
IF(TEMPAC.LE.GD13)ETAP(3)=JJ
```

```
IF(TEMPAC.LE.GD13)GO TO 390
```

```
IF(TEMPAC.LE.GD14)ETAP(4)=JJ
```

```
IF(TEMPAC.LE.GD14)GO TO 390
IF(TEMPAC.LE.GD15)ETAP(5)=JJ
IF(TEMPAC.LE.GD15)GO TO 390
IF(TEMPAC.GT.GD15)JJ=0
%
% INDICADORES DE QUE CONCLUIO EL CICLO DE CULTIVO
IC=1
IBC=0
PR1=0.
GO TO 390
370 ETAP(1)=JJ11
ETAP(2)=JJ12
ETAP(3)=JJ13
ETAP(4)=JJ14
ETAP(5)=JJ15
ILK=1
387 IF(JJ.LE.ETAP(NETAP1))GO TO 390
%
% INDICADORES DE QUE CONCLUIO EL CICLO DE CULTIVO
JJ=0
IC=1
IBC=0
PR1=0.
390 CONTINUE
%
% DETERMINACION DEL NUMERO DE DIAS CONSECUTIVOS SIN LLUVIA: 0
% RIEGO (KKK)
IF(J.GT.1)GO TO 392
```

```

IF(J.EQ.1.AND.LI(JFIN).GT.0.)KKK=0
IF(J.EQ.1.AND.LR(JULT).GT.0.)KKK=0
GO TO 395
392 IF(LI(J-1).GT.0.OR.LR(J-1).GT.0)KKK=0
395 KKK=KKK+1
%
% CALCULO DE LA LAMINA INFILTRABLE
IF(PP(J))400,400,410
400 LI(J)=0.
GO TO 460
410 CALL INFIL (J,N,COND1,COND3,JULT,PP,LI)
%
% CALCULO DE LA LAMINA DE EVAPORACION DEL SUELO Y, SI SE
% CULTIVA TRANSPIRACION Y EVAPOTRANSPIRACION MAXIMA .
% EXTRACCION A LA 'LAD' DE LA CAPA SUPERFICIAL LA LAMINA
% DE EVAPORACION DEL SUELO.
460 CALL EVAPO(J,JJ,ITOD1,TEMPAC,GD15,JJ15,KKK,CC1,JULT,
*HATM,EO,LAD,TM,E,ETM)
IF(JJ)480,480,470
%
% CALCULO DE LA TRANSPIRACION DEL CULTIVO Y EXTRACCION DE
% LAS RESPECTIVAS CAPAS.
470 CALL TRANSP(J,JJ,VL,NDC,VAST,PM1,RD1,DELTAX,TM,AD,ETAP,
*CI,AST,DA,PMP,XK,XN,CT,LAD,T,PR1)
%
% CALCULO DE LA LAMINA DE RIEGO (SOLO PARA EL MODELO EN EL MODO
% DE CALIBRACION CON ICAL=1)
480 IF(M.EQ.2.OR.ICAL.EQ.0)GO TO 485

```

```

DO 482 IK=1,NR
482IF(IIJ(IK).EQ.J)LR(JD=AD(1)+AD(2)+AD(3)-LAD(1,J)-LAD(2,J)-
*LAD(3,J)
%
% REDISTRIBUCION DEL AGUA Y LAS SALES INGRESADAS SUPERFICIALMENTE
% AL PERFIL DEL SUELO Y CALCULO DEL FLUJO CAPILAR ENTRE CAPAS.
485 CALL BALSAL(J,JJ,M,HDC,INF,POL,VAST,AD,C,C1AST,LR,LI,
*CSALNF,JULT,TL,ETAP,DELTA,COND,DA,PMP,XK,XN,CT,LAD,TS,Z)
IF(IC.NE.1)GO TO 4900
%
% CALCULO DE LA TRANSPIRACION Y TRANSPIRACION MAXIMA A CADA ETAPA
% DE DESARROLLO DEL CULTIVO, ASI COMO LA TRANSPIRACION, EVAPO-
% RACION Y EVAPOTRANSPIRACION A LO LARGO DE TODO EL CICLO.
SE=0.
R=0.
SETM=0.
DO 600 I=1,NETAP1
STM(I)=0.
ST(I)=0.
IF(I.NE.1)GO TO 500
DO 490 L=1,ETAP(1)
SETM=SETM+ETM(L)
ST(I)=ST(I)+T(L)
SE=SE+E(L+JS-1)
490 STM(I)=STM(I)+TM(L)
R=R+ST(I)
GO TO 600
500 DO 520 L=ETAP(I-1)+1,ETAP(I)

```

```

SETM=SETM+ETM(L)
ST(I)=ST(I)+T(L)
SE=SE+E(L+JS-1)
520 STM(I)=STM(I)+TM(L)
R=R+ST(I)
600 CONTINUE
X
X CALCULO DE LA EFICIENCIA PROMEDIO DE APLICACION DEL NITROGENO
NIT=IX1+ID1
EPAN=0.
DO 620 NN=1,NIT
620 EPAN=EPAN+((AA-BB*NN+DD*(R+SE)*10.)/(AA-BB*NN+DD*
*SETM*10.))/NIT
IF(EPAN.GT.1.)EPAN=1.
YM=REN*EPAN
X
X CALCULO DEL RENDIMIENTO SIMULADO
Y1(IA)=YM*((ST(1)/STM(1))*AL11)*((ST(2)/STM(2))*AL12)*
*((ST(3)/STM(3))*AL13)*((ST(4)/STM(4))*AL14)*((ST(5)/
*STM(5))*AL15)
4900 II=0
IF(IL.EQ.0)GO TO 5000
IF(JJ.EQ.0)GO TO 4920
X
X IMPRESION DE LOS RESULTADOS DIARIOS CUANDO SE CULTIVA
WRITE(6,19)IDIA,MES,EO(J),ETM(JJ),TM(JJ),E(J),T(JJ),
*Z(J),PP(J),LAD(1,J),LAD(2,J),LAD(3,J),
*C1AST(1,J),C1AST(2,J),C1AST(3,J),PRI

```

GO TO 5000

X

X IMPRESION DE RESULTADOS DIARIOS CUANDO EN BARBECHO

4920WRITE(6,69)IDIA,MES,EO(J),E(J),PP(J),LAD(1,J),LAD(2,J),LAD(3,J),

*CIAST(1,J),CIAST(2,J),CIAST(3,J)

X

X CONCLUSION DEL DIA DE SIMULACION

5000 CONTINUE

X

X INDICADOR QUE EN EL NUEVO AÑO SE PUEDE CULTIVAR

IBC=1

WRITE(6,29)

X

X IMPRESION DE RESULTADOS POR ETAPA DE DESARROLLO

DO 9000 I=1,NETAP1

9000 WRITE(6,39)I,ST(I),STM(I)

WRITE(6,49)IANO

X

X IMPRESION DEL RESULTADO FINAL ANUAL

WRITE(6,59)YM,EPAN,Y1(IA)

10000 IANO=IANO+1

GO TO 12000

X

X FORMATOS DE LECTURA E IMPRESION

11000 IF(J.NE.1)WRITE(5,119)

11 FORMAT(6I2,2I3,4I2,F3.1)

21 FORMAT(10F4.2,4I1,F4.1)

31FORMAT(3F5.2)

41 FORMAT(3F8.3)

51 FORMAT(6F6.0)

61 FORMAT(7F5.0)

71 FORMAT(6I3)

81 FORMAT(I2,3F5.2)

91 FORMAT(10F4.2)

101 FORMAT(2I3,F5.3)

111 FORMAT(6F8.5)

121 FORMAT(5F3.1)

131 FORMAT(20F4.1)

141 FORMAT(4I4)

151 FORMAT(80I1)

161 FORMAT(F4.1)

171 FORMAT(2I3)

181 FORMAT(14F5.2)

191 FORMAT(I2)

201 FORMAT(9(I3,F5.2))

211 FORMAT(10I3)

1111 FORMAT(10(A6))

9 FORMAT(////,36X,'RESULTADOS DIARIOS',///,1X,'DIA MES EO ETM

* TM E T LR PP LAD1 LAD2 LAD3 C1AST1 C1AST2 C1AST3 PR

* ',///)

19 FORMAT(1X,I3,I5,2X,10F5.2,4F7.2)

29 FORMAT(////,2X,'RESULTADOS POR ETAPA FISIOLÓGICA',///,1X,

*'ETAPA SUMA TRANSP SUMA TRANSP MAX',///)

39 FORMAT(3X,I1,7X,F6.3,9X,F6.3)

49FORMAT(////,2X,'RESULTADOS FINALES DEL AÑO',2X,I2,///,1X,

*'RENDIMIENTO MAXIMO EPAN RENDIMIENTO SIMULADO',///)

```
59 FORMAT(6X,F7.0,9X,F4.2,10X,F7.0)
69 FORMAT(1X,I3,I5,2X,F5.2,10X,F5.2,10X,4F5.2,3F7.2)
99 FORMAT('1',///// ,25X,'LOCAL',32X,'POLITICA   POR   ETAPA'
*B   POR   ETAPA',///)
109FORMAT(10(A6),5F6.2,'**',5F6.2)
119FORMAT(///,'*****FECHA DE SIEMBRA INAPROPIADA*****')
12000 STOP
END
```

```

SUBROUTINE RM(MOP,FRRM,U,C1,C2,IX1,IX2,ID1,ID2,A1,A2,A3,A4,A5,A6,
*REN)
X*****
X ESTA SUBROUTINA CALCULA EL RENDIMIENTO MAXIMO (REN) EN
X FUNCION DE LA FERTILIZACION Y FECHA DE SIEMBRA.
X*****
IF(MOP.NE.0)GO TO 10
X
X RENDIMIENTO MAXIMO CALCULADO SEGUN MODELO DE MITSCHERLICH
REN=FRRM*U*(1.-EXP(-C1*(IX1+ID1)))*(1.-EXP(-C2*(IX2+ID2)))
GO TO 20
X
X RENDIMIENTO MAXIMO CALCULADO SEGUN MODELO POLINOMIAL
10 NIT=IX1+ID1
IP=IX2+ID2
REN=FRRM*(A1+A2*NIT+A3*IP+A4*NIT*IP-A5*NIT**2-A6*IP**2)
20 RETURN
END

```

```
SUBROUTINE INFIL(J,N,COND1,COND3,JULT,PP,LI)
```

```
X*****
```

```
X ESTA SUBROUTINA CALCULA LA LAMINA INFILTRABLE (LI) DE UNA  
X PRECIPITACION DADA (PP) EN FUNCION DE LA LLUVIA ANTERCEDENTE  
X Y DE ACUERDO AL NUMERO DE ESCURRIMIENTO (N) DEL SUELO.
```

```
X*****
```

```
DIMENSION PP(366),LI(366)
```

```
REAL LI
```

```
PP(J)=0.1*PP(J)
```

```
L=J
```

```
LL=N
```

```
IF(J.EQ.1)L=JULT+1
```

```
IF(PP(L-1)-2.54)10,20,30
```

```
10 CON=COND1
```

```
GO TO 50
```

```
20 IF(PP(L-1)-5.08)40,40,30
```

```
30 CON=COND3
```

```
GO TO 50
```

```
40 CON=1.
```

```
50 LL=LL*CON
```

```
S=(1000./LL-10.)*2.54
```

```
LI(J)=PP(J)-((PP(J)-0.2*S)**2)/(PP(J)+0.3*S)
```

```
RETURN
```

```
END
```

```

SUBROUTINE EVAPO(J,JJ,ITOD1,TEMPAC,GD15,JJ15,KKK,CC1,
*JUL,HATM,E0,LAD,TH,E,ETM)
X*****
X ESTA SUBROUTINA CALCULA LA EVAPORACION DEL SUELO (E) Y , SI
X SE CULTIVA, LA TRANSPIRACION Y EVAPOTRANSPIRACION MAXIMA
X (TM Y ETM)
X*****
  DIMENSION E0(366),LAD(10,366),TH(200),E(366),ETM(366),CC1(20)
  REAL LAD
  X
  X 0.065 ES EL COEFICIENTE DE CORRECCION DE LA EVAPORACION DE
  X TINA CLASE A , CON TRANSFORMACION DE LA LECTURA A CM.
  E0(J)=E0(J)*0.065
  IX=JJ
  X
  X JJ ES EL NUMERO DE DIAS DESPUES DE TRANSCURRIDA LA SIEMBRA.
  EM=E0(J)
  IF(IX.NE.0)GO TO 50
  IX=1
  GO TO 750
  X
  X DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE CULTIVO DE ACUERDO A SU
  X DESARROLLO, EN FUNCION DE LOS GRADOS-DIA ACUMULADOS.
  50 IF(ITOD1.NE.0)GO TO 200
  DO 100 I=1,20
  XI1=1*0.05*GD15
  IF(TEMPAC.LE.XI1)GO TO 150
  100 CONTINUE

```

X

X CALCULO DE LA ETM

150 ETM(IX)=CC1(I)*EO(J)

IF(IX.GT.10)GO TO 650

X

X TM EN LOS 10 PRIMEROS DIAS DE CRECIMIENTO

TM(IX)=0.

GO TO 750

X

X DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE CULTIVO DE ACUERDO A SU

X DESARROLLO, CUANDO SE CONOCEN LAS DURACIONES EN DIAS DE

X CADA ETAPA DE DESARROLLO.

200 DO 250 I=1,20

IJ1=IFIX(FLOAT(I)*0.05*FLOAT(JJ15))

IF(IX.LE.IJ1)GO TO 300

250 CONTINUE

X

X CALCULO DE ETM

300 ETM(IX)=CC1(I)*EO(J)

IF(IX.GT.10)GO TO 650

X

X TM EN LOS 10 PRIMEROS DIAS DE CRECIMIENTO

TM(IX)=0.

GO TO 750

X

X TM EN EL RESTO DEL PERIODO DE CRECIMIENTO

650 TM(IX)=0.9*CC1(I)*EO(J)

X

% CALCULO DE LA MINIMA EVAPORACION MAXIMA DEL SUELO

XEM=0.1*EO(J)

%

% CALCULO DE LA EVAPORACION MAXIMA DEL SUELO

EM=EO(J)-TM(IX)

IF(EM.LE.XEM)EM=XEM

%

% CALCULO DE LA EVAPORACION DEL SUELO KKK DIAS DESPUES DE

% HABER SIDO HUMEDECIDO.

75GE(J)=EM/KKK**0.5

%

% DEFINICION DE LA EVAPORACION MINIMA DEL SUELO

IF(E(J).LT.0.01)E(J)=0.01

%

% EXTRACCION DE LA EVAPORACION DEL SUELO A LA 'LAD' DE LA

% CAPA SUPERFICIAL.

IF(J.EQ.1)LAD(1,J)=LAD(1,JULT)-E(J)

IF(J.EQ.1)GO TO 55

LAD(1,J)=LAD(1,J-1)-E(J)

%

% RESTRICCION AL MINIMO CONTENIDO DE 'LAD' EN LA CAPA

% SUPERFICIAL DEL SUELO

55IF(LAD(1,J)=HATM)60,60,70

60 LAD(1,J)=HATM

70 CONTINUE

RETURN

END

```
SUBROUTINE TRANSP(J,JJ,VL,NDC,VAST,PM1,RD1,DELTAX,TM,AD,
*ETAP,C1AST,DA,PMP,XK,XN,CT,LAD,T,PR1)
```

```
X*****
```

```
X ESTA SUBROUTINA CALCULA LA TRANSPIRACION DEL CULTIVO EN
X FUNCION DEL CONTENIDO DE AGUA Y SALES EN CADA UNA DE LAS
X CAPAS DEL SUELO.
```

```
X*****
```

```
  DIMENSION T(200),TM(200),VAST(10),AD(10),POR(10),
*C1AST(10,366),TS(10,366),LAD(10,366),PAD(10,366),
*DA(10),PMP(10),XK(10),XN(10),CT(10),VL(5),ETAP(5)
  REAL LAD
```

```
X
```

```
X CALCULO DE LA MAXIMA PROFUNDIDAD RADICULAR
PRM=NDC*DELTAX
```

```
X
```

```
X CALCULO DE LA PROFUNDIDAD RADICULAR
PR1=PM1/(1.+EXP(6.-12.*FLOAT(JJ)/RD1))
```

```
IF(PR1.GT.PRM)PR1=PRM
```

```
T(JJ)=D.
```

```
TTM=TM(JJ)
```

```
X
```

```
X CALCULO DE LA TENSION DE SUCCION DEL SUELO EN CADA CAPA,
X DEBIDA EXCLUSIVAMENTE AL CONTENIDO DE HUMEDAD.
```

```
CALL TENSU(J,NDC,DELTAX,DA,PMP,XK,XN,CT,LAD,TS)
```

```
X
```

```
X CALCULO DE LA TENSION TOTAL DEL SUELO (INCLUYE EFECTO
X OSMOTICO)
```

```
DO 1 I=1,NDC
```

```

1 TS(I,J)=TS(I,J)+(0.035*C1AST(I,J)*VAST(I)/
*(LAD(I,J)+PMP(I)*DA(I)*DELTAX/100.))*1000.

```

```

X

```

```

X CALCULO DE LA LAMINA DE AGUA DISPONIBLE FICTICIA

```

```

CALL SUTEN(J,NDC,DELTAX,DAI,PMP,XK,XN,CT,TS,PAD)

```

```

X

```

```

X DETERMINACION DEL PORCIENTO DE LAMINA DE AGUA (FICTICIA)

```

```

X DISPONIBLE EN EL SUELO

```

```

DO 10 I=1,NDC

```

```

10 POR(I)=PAD(I,J)/AD(I)

```

```

X

```

```

X CALCULO DE LA LAMINA DE TRANSPIRACION DEL CULTIVO

```

```

IJ=1

```

```

11 ESPES=0.

```

```

JI=1

```

```

DO 20 I=1,NDC

```

```

IF(POR(I).LE.0.)POR(I)=0.

```

```

IF(POR(I).GT.POR(JI))JI=I

```

```

ESPES=ESPES+DELTAX

```

```

IF(ESPES-PR1)20,25,25

```

```

20 CONTINUE

```

```

25 IF(PAD(JI,J))150,150,30

```

```

30 IF(JJ.LE.ETAP(1))B=VL(1)

```

```

IF(JJ.GT.ETAP(1).AND. JJ.LE.ETAP(2))B=VL(2)

```

```

IF(JJ.GT.ETAP(2).AND. JJ.LE.ETAP(3))B=VL(3)

```

```

IF(JJ.GT.ETAP(3).AND. JJ.LE.ETAP(4))B=VL(4)

```

```

IF(JJ.GT.ETAP(4))B=VL(5)

```

```

IF(POR(JI)=B)35,120,120

```

```
35 TT=TTM*POR(JI)/B
IF(PAD(JI,J)-TT)130,150,40
40 PAD(JI,J)=PAD(JI,J)-TT
LAD(JI,J)=LAD(JI,J)-TT
T(JJ)=T(JJ)+TT
43 IF(IJ-1)45,45,150
45 IJ=IJ+1
TTM=TTM-TT
POR(JI)=PAD(JI,J)/AD(JI)
GO TO 11
120 PAD(JI,J)=PAD(JI,J)-TTM
LAD(JI,J)=LAD(JI,J)-TTM
T(JJ)=T(JJ)+TTM
GO TO 150
130 TT=PAD(JI,J)
T(JJ)=T(JJ)+TT
PAD(JI,J)=0.
LAD(JI,J)=LAD(JI,J)-TT
GO TO 43
150 CONTINUE
RETURN
END
```

SUBROUTINE TENSU(J,NDC,DELTA,DA,PMP,XK,XN,CT,LAD,TS)

X*****

X ESTA SUBROUTINA CALCULA LA TENSION DE SUCCION DEL SUELO (TS)

X EN FUNCION DE LA LAMINA DE AGUA DISPONIBLE (LAD) Y DE

X ACUERDO A LOS PARAMETROS DE LA CURVA DE RETENCION DE AGUA

X DE CADA CAPA.

X*****

DIMENSION CH(10),LAD(10,366),TS(10,366),DA(10),PMP(10),

*XK(10),XN(10),CT(10)

REAL LAD

DO 10 I=1,NDC

CH(I)=100.*(LAD(I,J)/(DELTA*DA(I)))+PMP(I)

10 TS(I,J)=(XK(I)*CH(I)**(-XN(I))-CT(I))*1000.

RETURN

END

SUBROUTINE SUTEN(J,NDC,DELTAX,DA,PMP,XK,XN,CT,TS,LAD)

X ESTA SUBROUTINA SE EMPLEA PARA DETERMINAR LA LAMINA FICTICIA
 X DE AGUA DISPONIBLE EN EL SUELO (PAD) EN FUNCION DE LA
 X TENSION TOTAL DE SUCCION DEL SUELO (TS), EN CADA CAPA Y DE
 X ACUERDO A LOS PARAMETROS DE SUS RESPECTIVAS CURVAS DE
 X RETENCION DE AGUA.

DIMENSION CH(10),LAD(10,366),TS(10,366),DA(10),PMP(10),
 *XK(10),XN(10),CT(10)

REAL LAD

DO 10 I=1,NDC

CH(I)=((TS(I,J)/1000.+CT(I))/XK(I))**(-1./XN(I))

10 LAD(I,J)=(CH(I)-PMP(I))*DA(I)*DELTAX/100.

RETURN

END

```

SUBROUTINE BALSAL(J,JJ,M,NDC,INF,POL,VAST,AD,C,C1AST,LR,LI,
*CSALNF,JULT,TL,ETAP,DELTA,COND,DA,PMP,XK,XN,CT,LAD,TS,Z)
X*****

```

```

X ESTA SUBROUTINA REALIZA LA REDISTRIBUCION DE LA LAMINA DE
X INFILTRACION (LI) Y DE RIEGO (LR) QUE INGRESAN
X SUPERFICIALMENTE AL PERFIL DEL SUELO, ASI COMO CALCULA
X Y REDISTRIBUYE EL FLUJO CAPILAR DEBIDO A LA DIFERENCIA DE
X TENSIONES DE SUCCION ENTRE DOS CAPAS CONTIGUAS, UNA DE
X LAS CUALES PUEDE ENCONTRARSE EN LA SATURACION Y
X REPRESENTAR EL NIVEL FREATICO.

```

```

X*****

```

```

DIMENSION CH(10),LAD(10,366),TS(10,366),VAST(10),AD(10),
*C1AST(10,366),LR(366),LI(366),DEF(10),V(366),DA(10),
*PMP(10),XK(10),XN(10),CT(10),Z(366),A(10),TL(5),ETAP(5)
REAL LAD,LR,LI

```

```

IF(M.EQ.1.OR.JJ.EQ.0)GO TO 10

```

```

X

```

```

X DETERMINACION DE LA LAMINA DE RIEGO SI SE CULTIVA Y EL MODELO
X ESTA EN EL MODO DE PREVISION.

```

```

IF(JJ.LE.ETAP(1))POL=TL(1)

```

```

IF(JJ.GT.ETAP(1).AND.JJ.LE.ETAP(2))POL=TL(2)

```

```

IF(JJ.GT.ETAP(2).AND.JJ.LE.ETAP(3))POL=TL(3)

```

```

IF(JJ.GT.ETAP(3).AND.JJ.LE.ETAP(4))POL=TL(4)

```

```

IF(JJ.GT.ETAP(4))POL=TL(5)

```

```

LR(J)=(AD(1)+AD(2)+AD(3)-LAD(1,J)-LAD(2,J)-LAD(3,J))*1.0

```

```

DD=POL*AD(1)

```

```

IF(LAD(1,J).GT.DD)LR(J)=0.

```

```

10 IF(JJ.EQ.0)LR(J)=0.

```

```
Z(J)=LR(J)
```

```
%
```

```
% LAMINA TOTAL QUE INGRESA SUPERFICIALMENTE AL PERFIL DEL SUELO.
```

```
V(J)=LI(J)+LR(J)
```

```
IF(V(J))120,120,20
```

```
20 K=0
```

```
%
```

```
% CALCULO DE LA LAMINA DE DEFICIENCIA CON RESPECTO A LA
```

```
% CAPACIDAD DE CAMPO.
```

```
DO 22 I=1,NDC
```

```
DEF(I)=AD(I)-LAD(I,J)
```

```
22 IF(DEF(I).LE.0.)DEF(I)=0.
```

```
%
```

```
% REDISTRIBUCION DEL AGUA Y LAS SALES INGRESADAS SUPERFICIALMENTE
```

```
% AL PERFIL DEL SUELO
```

```
DO 100 I=1,NDC
```

```
X=V(J)-DEF(I)-2*VAST(I)
```

```
IF(X)25,25,50
```

```
25 A(I)=(V(J)-DEF(I))/2.
```

```
IF(A(I))30,30,40
```

```
30 A(I)=0.
```

```
LAD(I,J)=LAD(I,J)+V(J)
```

```
K=1
```

```
GO TO 45
```

```
40 LAD(I,J)=AD(I)
```

```
45 IF(J.EQ.1)C1AST(I,J)=(LR(J)*C+(VAST(I)-A(I))*C1AST(I,JULT))/
```

```
*(VAST(I)+A(I))
```

```
C1AST(I,J)=(LR(J)*C+(VAST(I)-A(I))*C1AST(I,J-1))/(VAST(I)+A(I))
```

```

GO TO 60
50 CIAST(I,J)=LR(J)*C/(V(J)-DEF(I))
LAD(I,J)=AD(I)
60 IF(K)70,70,120
70 V(J)=V(J)-DEF(I)
IF(LR(J))100,100,80
80 LR(J)=LR(J)-DEF(I)
IF(LR(J))90,100,100
90 LR(J)=0.
100 CONTINUE
X
% CALCULO DE LAS TENSIONES DE SUCCION DEL SUELO DESPUES DE LA
% REDISTRIBUCION DE LO INGRESADO SUPERFICIALMENTE.
120 CALL TENSU(J,NDC,DELTAX,DA,PMP,XK,XN,CT,LAD,TS)
X
% CALCULO DEL FLUJO CAPILAR ENTRE CAPAS Y CONTRIBUCION DEL
% NIVEL FREATICO
DO 200 I=1,NDC
IF(INF.EQ.0)K=NDC-I
IF(INF.NE.0)K=NDC-I+1
IF(K.EQ.0)GO TO 200
IF(K.EQ.NDC)DIF=TS(K,J)
IF(K.EQ.NDC)GO TO 130
DIF=TS(K,J)-TS(K+1,J)-DELTAX
130 FLUJO=ABS(DIF)*COND/DELTAX
IF(FLUJO.GT.0.2)FLUJO=0.2
IF(DIF)150,200,140
140 K=K+1

```

```
IF(K.EQ.NDC+1)COFLU=CSALNF
IF(K.EQ.NDC+1)GO TO 155
150 COFLU=VAST(K)*C1AST(K,J)/(LAD(K,J)+PMP(K)*DA(K)*DELTAX/100.)
LAD(K,J)=LAD(K,J)-FLUJO
C1AST(K,J)=(LAD(K,J)+PMP(K)*DA(K)*DELTAX/100.)*COFLU/VAST(K)
CALL TENSU(J,NDC,DELTAX,DA,PMP,XK,XN,CT,LAD,TS)
155 IF(DIF)170,200,160
160 K=K-2
170 C1AST(K+1,J)=(C1AST(K+1,J)*VAST(K+1)+COFLU*FLUJO)/VAST(K+1)
LAD(K+1,J)=LAD(K+1,J)+FLUJO
CALL TENSU(J,NDC,DELTAX,DA,PMP,XK,XN,CT,LAD,TS)
200 CONTINUE
RETURN
END
```

SUBROUTINE PAR(NDC, DELTAX, CCH, PMP, CHSAT, XK, XN, CT)

X ESTA SUBROUTINA CALCULA LOS PARAMETROS DE LA CURVA DE
 X RETENCION DE AGUA EN CADA UNA DE LAS CAPAS DEL SUELO (XK,
 X XN, CT), EN FUNCION DE SUS CONTENIDOS DE HUMEDAD
 X CARACTERISTICOS (PMP, CCH Y CHSAT)

DIMENSION CHSAT(10), AD(10), PMP(10), XK(10), XN(10), DA(10), QL(10),
 *CT(10), CCH(10)

DO 100 I=1, NDC

QL(I)=ALOG(CHSAT(I)/PMP(I))/ALOG(CCH(I)/PMP(I))

CT(I)=1.1122*(QL(I)**(-7.4147))

XN(I)=ALOG((15.+CT(I))/(9.3+CT(I)))/ALOG(CCH(I)/PMP(I))

100 XK(I)=CT(I)*CHSAT(I)**XN(I)

RETURN

END