

01177
5
2e)



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

"SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL EFECTO DE LA SALINIDAD
EN LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS"

TESIS

PRESENTADA POR
LEOPOLDO SÁNCHEZ ESPINOZA

BAJO LA DIRECCIÓN DE
DR JESÚS GRACIA SÁNCHEZ

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA
AMBIENTAL

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MÉXICO, D.F.

mayo 1994





Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

RECIBI COPIA DE: () TRABAJO ESCRITO
(XXXX) TESIS

DESARROLLADO POR EL ALUMNO: LEOPOLDO SANCHEZ ESPINOZA

PARA PRESENTAR EXAMEN:

() DE ESPECIALIZACION

(XX) DE GRADO

EN INGENIERIA: AMBIENTAL

	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE:	DRA. GEORGINA FERNANDEZ VILLAGOMEZ	9/11/94
VOCAL:	DR. JESUS GRACIA SANCHEZ	9/11/94
SECRETARIO:	M EN I. ROSARIO ITURBE ARGUELLES	11/11/94
SUPLENTE:	M EN I. ANA ELISA SILVA MARTINEZ	11/11/94
SUPLENTE:	M EN I. EDUARDO VEGA GONZALEZ	9/21/94

APROBACION DEL TRABAJO O DE TESIS POR EL DEPARTAMENTO _____
DE INGENIERIA AMBIENTAL _____

PROMEDIO EN CREDITOS DOCE (12) _____

EDM*VJA*jac.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

A MIS PADRES

Sra. CIRILA T ESPINOZA CHÁVEZ
Sr. J MARTÍN SÁNCHEZ ÁVALOS.

A MIS HERMANOS

ELVIA, ELSA, ETELVINA
ALEJANDRO, OCTAVIANO, ESTEBAN.

A MIS SOBRINOS

ANGÉLICA M, LESLY L, TERE
ARTURO J, MARTÍN A, RENE, JESÚS.

INDICE

	página
LISTA DE CUADROS Y FIGURAS	iii
RESUMEN	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. SALINIDAD DE LOS SUELOS	6
2.1. Tipo y origen de las sales del suelo	6
2.2. Efecto de la salinidad en el crecimiento de las plantas	9
2.3. Clasificación de los suelos salinos	11
2.4. Calidad del agua de riego	14
2.5. Manejo y recuperación de los suelos salinos	19
3. DESCRIPCION DEL MODELO MATEMATICO	27
3.1. Movimiento del agua en el suelo	28
3.2. Movimiento y acumulación de sales en el suelo	34
3.3. Contenido de agua en el suelo y su efecto en la producción de los cultivos	40
3.4. Esquema numérico de solución de la ecuación de transporte de sal	43
4. APLICACION DEL MODELO Y PLANTEAMIENTO DE LOS EJEMPLOS NUMERICOS DE SIMULACION	50
4.1. Ecuaciones para modelar el movimicnto del agua	51
4.2. Datos físicos del suelo	53
4.3. Datos climatológicos	54
4.4. Datos biológicos del cultivo	54
4.5. Condiciones iniciales de humedad y concentración de soluto en el suelo	56
4.6. Características fisicoquímicas del soluto	58
4.7. Relación entre la conductividad eléctrica y el contenido de sales de una solución	59
4.8. Calidad del agua para riego	60
5. ANALISIS DE RESULTADOS	64
5.1. Evolución de la humedad promedio en el perfil del suelo, durante el C.V., en las políticas de H.A., 30 y 50 por ciento, y bajo condiciones de salinidad del suelo y agua de riego	64
5.2. Perfiles de humedad y concentración del ión cloruro (Cl ⁻), durante el ciclo vegetativo (C.V.)	67

5.3. <i>Perfiles de humedad y concentración del ión cloruro, durante el riego</i>	73
5.4. <i>Rendimiento del cultivo</i>	78
5.5. <i>Efecto del nivel freático</i>	79
6. <i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	82
<i>REFERENCIAS</i>	86
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	86
<i>APENDICE (Diagrama de flujo y listado del programa de cálculo)</i>	87

LISTA DE CUADROS Y FIGURAS

cuadro 2.3.1. Clasificación de los suelos sódicos, ref 5.	13
cuadro 2.4.3.1. Límites permisibles de boro para aguas de riego, ref 4.	18
cuadro 2.5.1.3.1. Tolerancia relativa de los cultivos a las sales, ref 4.	23
cuadro 4.4.3.1. Duración de las etapas fenológicas del cultivo de sorgo para grano, determinadas a partir de la fig 4.4.3.1, ref 7.	55
cuadro 4.4.4.1. Datos sobre las recomendaciones para el cultivo del sorgo para grano, tomados de la ref 7.	56
cuadro 5.1. Rendimiento del grano de sorgo bajo diferentes condiciones de humedad, suelo y agua de riego.	79
fig. 2.2.1. Efecto de la salinidad del suelo sobre la disposición de agua para las plantas, ref 3.	10
fig. 2.2.2. Relación entre el pH del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas, en suelos orgánicos y minerales, ref 3.	11
fig. 2.4.2.1. Nomograma para determinar el valor de la RAS del agua para riego, ref 4.	16
fig. 2.4.2.2. Diagrama para la clasificación de las aguas de riego, basada en el contenido total de sales (CE) y el contenido relativo de sodio (RAS), ref 4.	17
fig. 2.5.1.1.1. Distribución de la sal con riego por surcos. Suelo con salinidad inicial de 0.2% e irrigado con agua de salinidad mediana, ref 4.	21
fig. 2.5.1.2.2. Métodos de preparación de la cama de siembra para para reducir los efectos de las sales solubles en las plantas, ref 4.	21
fig. 2.5.2.1.1. Cantidad estimada de agua normal (baja en sales) requerida para remover sales de suelos salinos, ref 3.	24
fig. 3.1.1. Movimiento del agua en el suelo, considerando un volúmen unitario, ref 2.	28
fig. 3.1.1.1. Representación esquemática de la extracción del agua del suelo por parte de la raíz del cultivo, ref 2.	31
fig. 3.1.1.2. Relación entre la tensión de la humedad del suelo (ψ) y el cociente E_r/E_{Tp} , ref 2.	32

<i>fig. 3.3.1</i>	Representación gráfica de la relación de la tensión del suelo (ψ), el cociente E_r/E_{Tp} y la producción de un cultivo, <i>ref 2</i> .	42
<i>fig. 3.4.1</i>	Representación gráfica de la malla de cálculo.	44
<i>fig. 4.4.1.1.</i>	Curva de K_c del cultivo de sorgo para grano, <i>ref 7</i> .	54
<i>fig. 4.4.3.1</i>	Curva que relaciona el cociente E_r/E_{Tp} con el crecimiento del cultivo, a partir de la cual se determina la duración de c/u de las etapas fenológicas del cultivo, <i>ref 7</i> .	56
<i>fig. 4.5.2.1.</i>	Concentración de los extractos de saturación de los suelos, en meq/l y su relación a CE, <i>ref 4</i> .	58
<i>fig. 4.8.1.</i>	Relación entre la concentración de sales y la conductividad eléctrica de las aguas para riego, <i>ref 4</i> .	61
<i>figs. 5.1.1 y 5.1.2.</i>	Humedad promedio diaria en el perfil del suelo, durante el ciclo vegetativo del sorgo.	65
<i>figs. 5.2.1.1 y 5.2.1.2.</i>	Distribución de la humedad en el perfil del suelo.	68
<i>figs. 5.2.2.1 y 5.2.2.2.</i>	Distribución de la concentración del ión cloruro (Cl^-), en el perfil del suelo.	71
<i>figs. 5.3.1.1 y 5.3.1.2.</i>	Distribución de la humedad en el perfil del suelo, durante el primer riego.	74
<i>figs. 5.3.2.1 y 5.3.2.2.</i>	Distribución de la concentración del ión cloruro (Cl^-) en el perfil del suelo, durante el primer riego.	76
<i>fig. 5.5.1.</i>	Evolución de la humedad promedio en el perfil del suelo, durante el ciclo vegetativo del sorgo, y bajo condiciones de suelo y nivel freático salinos	80
<i>fig. 5.5.2.</i>	Perfiles de concentración del ión cloruro (Cl^-), en algunos días del ciclo vegetativo del sorgo.	80

RESUMEN

En el presente trabajo se propone el empleo de un modelo matemático, para simular el movimiento y contenido de agua en un perfil de suelo, su efecto en el transporte y concentración de un soluto, y la relación de ambos fenómenos con la producción final de un cultivo. El modelo está basado en la ecuación de transporte de soluto en suelos, utilizando el método de diferencias finitas para su solución.

Para la evaluación de dicho modelo, se elaboró un programa de cálculo para computadora, en lenguaje Quick-Basic 4.5, y se realizaron varias simulaciones. El programa fue alimentado con datos que comprenden las condiciones climáticas, edáficas, de soluto y del cultivo, bajo las cuales se simuló. En los ejemplos presentados, se consideraron condiciones climáticas áridas, suelo de textura arcillosa, soluto no reactivo con el suelo (Cl^-) y un cultivo básico (sorgo).

Cargado el programa con los datos antes mencionados, se llevó al cabo la simulación de cinco ejemplos numéricos, los cuales consideraron dos políticas de humedad aprovechable (H.A), la presencia de un nivel freático salino y dos calidades de agua de riego.

Del análisis de los resultados se concluye que el modelo permite determinar, principalmente los siguientes aspectos: la evolución de la humedad y concentración del soluto en el perfil del suelo, el análisis de políticas de riego, cálculo de la producción final de los cultivos, análisis del lavado de los suelos, y la determinación de los efectos de salinización del suelo, por parte de un nivel freático salino.

1 INTRODUCCION

El aprovechamiento de las aguas de escurrimiento (presas), subterráneas (pozos) y residuales municipales (tratadas o no), ha permitido abrir nuevas y extensas áreas a la explotación agrícola. Esto en principio ha tenido dos efectos: económico y ambiental. El económico se refleja en un aumento en la producción de alimentos, lo cual ha mejorado la satisfacción de las necesidades de la población en constante crecimiento. En cuanto al aspecto ambiental, éste se impacta al alterar el ecosistema, tanto en su componente físico como biológico. En cuanto al componente físico, dada la utilización de fertilizantes y plaguicidas, se contaminan el aire, el agua y el suelo. Pero éste último, no sólo es contaminado por el uso de estos productos, sino también, por las aguas con que se riega; esto, debido a las sustancias que contiene en solución, principalmente sales.

Aunque puede presentarse la toxicidad debida a las altas concentraciones

de sodio, cloro y otros iones, las sales generalmente afectan el crecimiento de las plantas por su efecto osmótico, ya que si se tiene un suelo con alto contenido de sales, esto provocará que la humedad contenida en éste sea retenida con mayor fuerza, ocasionando que las plantas utilicen más energía para obtener dicha humedad.

La contaminación por las sales solubles de los suelos ha causado problemas durante toda la historia, principalmente en las regiones más áridas del mundo, donde la lluvia significa poca o ninguna oportunidad de que las sales sean lavadas del suelo; si a esto se suma el hecho de que las aguas para riego puedan contener de 0.1 a 5 toneladas de sal por hectárea en una lámina de 30 cm de agua, y que la aplicación anual de ésta puede llegar hasta 1.5 m o más, entonces, se puede comprender que en períodos relativamente cortos, pueden agregarse a los suelos cantidades considerables de sales solubles. Pero además, si el nivel de la capa freática se encuentra a 1.80 m, o menos, de la superficie del suelo, esto conlleva a que el agua subterránea se mueva hacia arriba por capilaridad, llegando a la zona radicular del cultivo, e incluso hasta la superficie del suelo; provocando entonces, que tanto el agua subterránea como la de riego, contribuyan a la salinización del suelo.

Lo anterior permite inferir, que tanto la calidad del agua como las prácticas de riego y las condiciones de drenaje son aspectos muy importantes a considerar, en cuanto al control de la salinidad y al exceso de sodio en los suelos se refiere. Es así que, cuando se establece un proyecto de riego, los suelos que son inicialmente salinos pueden requerir el lavado del exceso de sales, y aún de la aplicación de mejoradores químicos; independientemente de asegurarles un abastecimiento adecuado de agua. Por otra parte, los suelos que inicialmente no son salinos, pueden volverse improductivos si se acumula un exceso de sales solubles o de sodio intercambiable, debido al riego, manejo inadecuado de estos suelos, o al establecimiento de un mal drenaje.

Actualmente los devastadores efectos de la sal son evidentes en muchas áreas agrícolas de producción intensiva (tierras de riego). Ante tal evidencia, y dada la alta densidad de la población, se hace imperativo

usar o recuperar suelos salinos, así como evitar más daños a los suelos actualmente en uso. Cálculos aproximados, indican que de las 203 millones de hectáreas regadas, correspondientes a 103 países, 50 millones de ellas tienen problemas de salinidad, lo que implica severas limitaciones para la producción agrícola mundial por unidad de superficie.

En México, existen algunas regiones que se encuentran afectadas por problemas derivados de la salinidad o de la sodificación de los suelos. Se cree que alrededor de un 20 por ciento de la superficie total de los distritos de riego, es decir unas 500 mil hectáreas, sufren en un grado más o menos avanzado ese problema, especialmente en la parte norte y noroeste del país.

Por otra parte, el desarrollo de las plantas está en función del esfuerzo total que éstas realizan para obtener el agua contenida en el suelo. Dicho esfuerzo está representado, principalmente por la suma de la tensión de humedad por parte del suelo y de la tensión osmótica de la solución de éste. Una manera de controlarlo, es mediante el lavado de las sales del perfil del suelo, esto con el fin de que la tensión osmótica de la solución del suelo se mantenga al nivel más bajo posible; y que, mediante un sistema práctico de riego, la tensión de humedad del suelo en la zona de las raíces se mantenga dentro de límites que permitan la mayor productividad del cultivo.

Para determinar el efecto de la sal en la producción de cultivos, es necesario conocer cómo varía la concentración de sal en el perfil del suelo, así como su movimiento dentro de éste; y por otro lado, cómo afecta la tensión total del agua en el suelo ($\psi_{matriz} + \psi_{solute}$) la producción de un cultivo.

Para predecir el movimiento del soluto y su variación de concentración en el suelo, en la ref 1 se propone la siguiente ecuación; la cual será presentada detalladamente en el capítulo 3.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta C) = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(V, \theta) \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \frac{\partial (qC)}{\partial z}$$

Donde θ es el contenido volumétrico de agua del suelo en cm^3/cm^3 ; C es la concentración de soluto de la solución del suelo en meq/cm^3 ; q es el flujo volumétrico de agua en $\text{cm}^3/\text{cm}^2\text{-h}$; D es el coeficiente de difusión del soluto en cm^2/h , el cual depende de la velocidad promedio del flujo V ($V = q/\theta$, en cm/h) y θ ; t es el tiempo en horas; y z es la coordenada espacial vertical en cm. Esta ecuación considera que los cambios en la concentración de sal dependen del contenido de humedad en el suelo, así como de su transporte dentro del perfil, y donde éste último se lleva a cabo mediante dos procesos principales, difusión y convección. La difusión es el movimiento molecular o iónico de un soluto dentro de la solución del suelo, mientras que la convección es el movimiento volumétrico de la solución a través del perfil.

Para el cálculo del flujo convectivo, dados por V y q, se utiliza el modelo propuesto en la ref 2, el cual considera que el contenido y movimiento del agua en el suelo dependen de la tensión de humedad en el suelo y de la extracción radicular de un cultivo.

En cuanto al cálculo de la producción de cultivos, se utilizan las ecuaciones propuestas en la ref 6; en dichas ecuaciones se supone que la producción depende principalmente del esfuerzo (tensión) que realiza el cultivo para extraer el agua del suelo.

Considerando lo antes expresado, en este trabajo se propone un modelo matemático que permite simular el movimiento de la sal en el perfil del suelo, así como el efecto de la variación en su concentración, en la producción de los cultivos.

Para el presente trabajo, se fijaron los siguientes objetivos:

- 1). Proponer el esquema de solución de la ecuación de transporte de soluto.
- 2). Elaborar un programa de cálculo para computadora, que permita el análisis sistémico de los siguientes elementos: agua, soluto, planta y suelo.
- 3). Simular el movimiento del agua y soluto en el perfil del suelo, con

la presencia de un cultivo.

- 4). Simular el efecto de la concentración de soluto en el suelo, en la producción de un cultivo.

Para lograr estos objetivos, el trabajo se desarrolló de la siguiente manera:

Se propuso el método de diferencias finitas para resolver la ecuación de transporte de soluto en el perfil del suelo. Con esta solución se elaboró un programa de cálculo en lenguaje Quick-Basic, 4.5. El programa se ensambló con el mencionado en la ref 2 (simulación del movimiento y contenido de agua en el suelo); incluyéndose además, las ecuaciones correspondientes al cálculo de la producción de cultivos. Es así, que el programa resultante permitió determinar el movimiento del agua y soluto en el perfil del suelo, la variación en la concentración del soluto, y su efecto en el rendimiento de un cultivo.

Para la evaluación del modelo, el programa fue cargado con datos característicos del suelo, soluto, cultivo y clima. Se realizó la simulación de cinco ejemplos numéricos propuestos, considerando diferentes condiciones iniciales de ψ_{matriz} , concentración de soluto y política de humedad aprovechable (política de riego). El programa realiza cálculos a incrementos de tiempo de cinco minutos; pero para el caso de la producción de cultivos esto lo hace cada 24 horas, considerando sólo los valores promedio de la ψ_{matriz} y los de la concentración de soluto, que se tienen con relación a la profundidad radicular.

Los resultados de las simulaciones son analizados; y finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

2 SALINIDAD DE LOS SUELOS

2.1 TIPO Y ORIGEN DE LAS SALES DEL SUELO

Normalmente el 98 por ciento de las sales solubles del suelo consisten principalmente de varias proporciones de los cationes sodio Na^+ , potasio K^+ , calcio Ca^{++} , y magnesio Mg^{++} y de los aniones cloruro Cl^- y sulfato SO_4^{--} ; el catión potasio y los aniones bicarbonato HCO_3^- , carbonato CO_3^{--} y nitrato NO_3^- , se encuentran generalmente en cantidades menores. De las combinaciones posibles entre estos cationes y aniones se forman diferentes sales, que incluyen aquellas que son comúnmente las responsables directas del ensalitramiento de los suelos, y de muchos efectos negativos que alteran el desarrollo de las plantas.

Las sales del suelo pueden ser agrupadas en varias categorías, esto de acuerdo con el ácido del cual se originan, encontrándose principalmente: cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos.

Cloruros: Los cloruros son las sales derivadas de la reacción de alguna

base con ácido clorhídrico. En ellos se incluyen las sales más importantes que se encuentran en los suelos salinos, ya que son las más abundantes, y además, las más solubles y tóxicas a los cultivos. De ellas, la más importante es el cloruro de sodio, NaCl (llega a representar arriba del 50 por ciento del total de las sales presentes en la solución del suelo), aunque los cloruros de potasio KCl, de calcio, CaCl_2 y de magnesio MgCl_2 , si bien menos comunes que el primero, llegan a tener importancia sólo a nivel local.

En la mayoría de los suelos salinos, los cloruros predominan sobre otro tipo de sales; siempre que se tiene esta condición, es conveniente referirse a ella como salinidad de tipo clorhídrico.

Sulfatos: Los sulfatos son las sales derivadas del ácido sulfúrico. Estas sales son muy comunes en los suelos salinos, si bien en la mayoría de los casos no están presentes en grandes cantidades como los cloruros, estos ocupan un segundo lugar en cuanto a profusión. De ellas, las más importantes, por su toxicidad y su relativa abundancia, son el sulfato de magnesio MgSO_4 y el sulfato de sodio Na_2SO_4 . Otro sulfato, el de calcio CaSO_4 , puede encontrarse en cantidades elevadas, pero es muy poco soluble, y el sulfato de potasio K_2SO_4 , aunque es más soluble, generalmente se halla en cantidades reducidas. En algunos suelos salinos, los sulfatos llegan a predominar sobre los cloruros; en estos casos, dependiendo de las proporciones presentes, se habla de salinidad sulfática o sulfática-clorhídrica.

Carbonatos y bicarbonatos: Los carbonatos, son sales derivadas del ácido carbónico H_2CO_3 , que pueden encontrarse en cantidades muy elevadas en los suelos salinos y sódicos; de ellos el más importante es el carbonato de sodio Na_2CO_3 , tanto por su abundancia como por los efectos nocivos que ocasiona en suelos y plantas, debido principalmente a su alta solubilidad. Otro carbonato, el de calcio CaCO_3 , puede encontrarse en cantidades elevadas, pero es muy poco soluble. Los carbonatos de magnesio MgCO_3 y el de potasio K_2CO_3 , rara vez se encuentran en cantidades elevadas. De los carbonatos pueden formarse bicarbonatos, los cuales presentan solubilidades diferentes.

De todas las sales que han sido mencionadas, cinco pueden considerarse como las responsables de los problemas de salinidad y sodicidad de los suelos. En el caso de los suelos salinos, las sales más importantes son: a) el cloruro de sodio y el sulfato de sodio, por su abundancia y, en consecuencia, por los efectos osmóticos que ocasionan en las plantas, y en menor grado por su toxicidad; y, b) el cloruro de magnesio y el sulfato de magnesio, que son poco abundantes pero muy tóxicos para las plantas. Por otra parte, una sola sal es responsable de los problemas que caracterizan a los suelos sódicos: el carbonato de sodio, que ocasiona un incremento en el pH y el porcentaje de sodio intercambiable; con todos los problemas que esto implica.

Existen dos fuentes principales del origen de las sales en los suelos; una directa y otra indirecta. La fuente directa, y en todo caso la original, de la cual provienen todas las sales antes mencionadas son los minerales primarios y las rocas expuestas de la corteza terrestre; ya que durante el proceso de intemperización química, que comprende hidrólisis, hidratación, solución, oxidación y carbonatación, estos constituyentes gradualmente son liberados, adquiriendo mayor solubilidad.

Las fuentes indirectas de sales, son principalmente las aguas subterráneas, superficiales y residuales, que se utilizan para regar los suelos agrícolas, dado que éstas las contienen disueltas. La cantidad y concentración que de éstas contengan, va a depender de los materiales geológicos que han estado en contacto con ellas, así como del uso anterior que se les halla dado.

Ahora bien, los suelos salinos se encuentran principalmente en zonas de clima árido o semiárido. Esto se explica en cuanto que la lluvia juega un papel muy importante en el lavado horizontal y vertical de las sales, que originalmente se encuentran presentes en el perfil del suelo. De acuerdo con esto, es obvio que en regiones húmedas, generalmente no es común encontrar problemas de salinidad; no así en las regiones áridas, donde debido a la baja precipitación, las sales contenidas en el suelo no pueden ser lavadas, y si más bien, debido a la elevada evaporación característica de estas regiones, las sales tienden a concentrarse en la

superficie del suelo.

2.1.1 Solubilidad de las sales

El problema de la salinidad de los suelos y su efecto sobre el desarrollo de los cultivos está dado por la acumulación de sales presentes en estado soluble, o sea, disueltas en la solución del suelo.

Existen suelos que normalmente poseen contenidos elevados de sales, pero en los cuales éstas se encuentran precipitadas, como ocurre en los suelos calcáreos y los yesosos, los cuales, aunque estrictamente por su contenido de sales son suelos salinos, no se les incluye dentro del problema de salinidad, pues como ya se ha mencionado, este problema depende no sólo de la cantidad de sales presentes, sino también de su estado de solubilidad.

La solubilidad de las sales en el agua, o sea, su capacidad para permanecer disueltas en un medio acuoso, es comúnmente expresada como la cantidad máxima de sal que puede disolverse en un volumen determinado de agua, o en otras palabras, como la concentración de la solución saturada.

Sin embargo, la solubilidad de las sales depende no sólo de su propia naturaleza y la del solvente (en este caso el agua del suelo), sino también de otros factores como son: la temperatura, la presión y la presencia de otras sales en la solución.

2.2 EFECTO DE LA SALINIDAD EN EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS

Aunque puede presentarse la toxicidad debida a las altas concentraciones de sodio, cloro y otros iones, las sales generalmente afectan el crecimiento de las plantas por su efecto osmótico, ya que la planta tendrá dificultades para absorber el agua. Esto se debe al hecho de que el potencial osmótico, junto con el potencial mátrico, son las fuerzas que controlan la retención de la humedad del suelo. De acuerdo con esto, el valor del potencial osmótico depende del contenido de sal presente en el suelo, y es por esto que si se tiene un suelo con un alto contenido de sales, esto provocará que la humedad contenida en éste sea

retenida con mayor fuerza, ocasionando que las plantas utilicen más energía para obtener dicha humedad. Lo anterior se puede apreciar claramente en la figura 2.2.1.

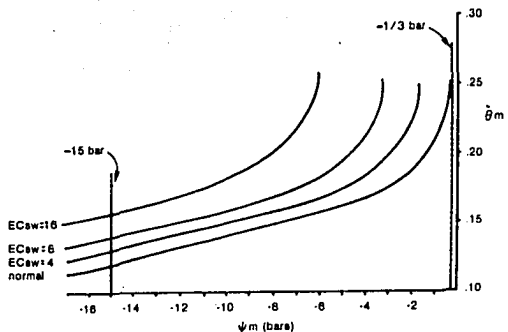


Figura 2.2.1. Efecto de la salinidad del suelo sobre la disposición de agua para las plantas, ref 3.

Una forma de contrarrestar el efecto de la salinidad, es manteniendo el suelo lo suficientemente húmedo, para que la planta no realice gran esfuerzo para extraerla, y evitar así daños en su crecimiento y/o producción.

Por otra parte, el efecto de la salinidad del suelo sobre la nutrición de las plantas, está dado por dos circunstancias. La primera, es que a concentraciones altas de sodio intercambiable, este elemento induce deficiencia en la asimilación de otros nutrientes, siendo las de calcio y magnesio las más notables; esto debido a que el sodio actúa como ión complementario, y de que provoca además la precipitación de dichos elementos (calcio y magnesio) en forma de carbonatos, reduciendo de esta manera su concentración en la solución del suelo.

La otra circunstancia es que, a medida que aumenta el porcentaje de sodio intercambiable, el pH del suelo también aumenta, y como se puede apreciar en el figura 2.2.2, esto provoca una disminución en la disponibilidad de ciertos nutrientes contenidos en el suelo, de acuerdo a lo dicho en el párrafo anterior.

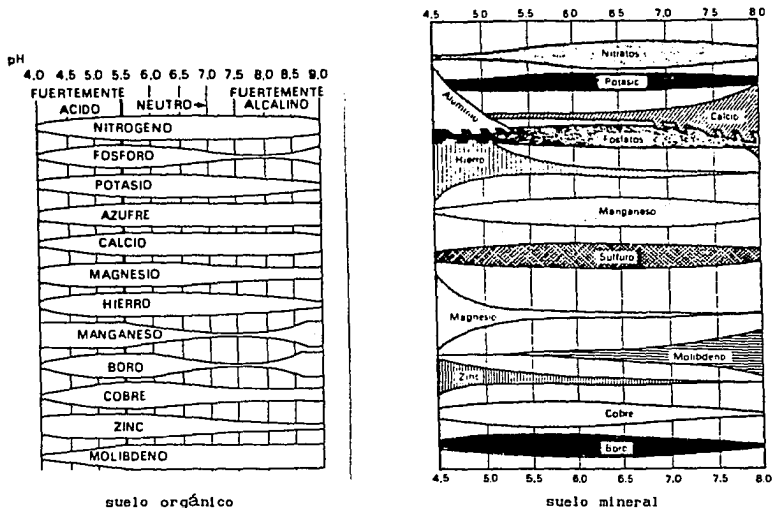


Figura 2.2.2. Relación entre el pH del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas, en suelos orgánicos y minerales, ref 3.

2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SALINOS

En el mundo existen varias clasificaciones de suelos salinos, cada una con ventajas e inconvenientes, las tres más importantes son la rusa, la francesa y la americana. Para efectos de este trabajo, se tomó como referencia la clasificación americana, ya que los parámetros utilizados para ordenar a este tipo de suelos, son más sencillos de determinar.

La clasificación americana utiliza fundamentalmente dos parámetros para caracterizar a los suelos afectados por sales, siendo estos los siguientes: a) la conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE_e), y, b) el porcentaje de sodio intercambiable (PSI). La CE_e indica los efectos de la salinidad sobre las plantas; mientras que el PSI es un índice de los efectos del sodio sobre las propiedades físicas de los suelos.

Para medir la conductividad eléctrica de un suelo, se mezcla una muestra de éste, de peso conocido, con agua (deionizada) para formar una pasta saturada; el líquido (extracto de saturación) es removido por succión y se mide su conductividad en milimhos/cm. Si es menor de 4 milimhos/cm, el suelo no es salino (normal).

En cuanto al porcentaje de sodio intercambiable (PSI), este requiere una medida de laboratorio de todos los cationes intercambiables, y del cálculo de los correspondientes al sodio. Lo anterior se obtiene a partir de la ecuación 2.3.1.

$$PSI = \frac{\text{iones de sodio intercambiables}}{\text{total de cationes intercambiables}} \times 100 \quad 2.3.1$$

De acuerdo a los valores que tomen estos dos parámetros, CEe y PSI, la clasificación americana de suelos salinos agrupa a éstos en tres categorías; salinos, sódicos y salino-sódicos (ref 4).

a). Suelos salinos

En estos suelos la conductividad eléctrica del extracto de saturación es mayor de 4 mmhos/cm a 25°C, con un porcentaje de sodio intercambiable menor del 15 por ciento, generalmente tienen un pH menor de 8.5. Los principales aniones son el cloruro, el sulfato y a veces el nitrato. Pueden presentarse pequeñas cantidades de bicarbonato, y los carbonatos solubles es raro encontrarlos. A veces pueden contener sales de baja solubilidad como yeso y caliza.

Estos suelos casi siempre se encuentran floculados, debido a la presencia de un exceso de sales, así como de la ausencia de cantidades significativas de sodio intercambiable, por lo cual la permeabilidad es igual o mayor que la de suelos con características similares pero no salinos.

En estos suelos el establecimiento de un drenaje adecuado, permite eliminar por lavado las sales solubles, volviendo de esta manera a ser suelos normales. Casi siempre se reconocen estos suelos por la presencia de costras blancas de sal en la superficie; dicha característica ha hecho que se les conozca como suelos "álcali blanco".

b). Suelos sódicos

Su conductividad eléctrica es menor de 4 mmhos/cm a 25°C, el porcentaje de sodio intercambiable es mayor del 15 por ciento, su pH varía entre 8.5 y 10. La solución del suelo contiene en su mayor parte cloruros, sulfatos y bicarbonatos, aunque puede haber pequeñas cantidades de carbonatos. A un pH muy elevado y en presencia de iones carbonato, el calcio y el magnesio se precipitan, por lo que la solución de estos suelos contienen pequeñas cantidades de calcio y magnesio, predominando el sodio.

Según el PSI, los suelos sódicos se pueden clasificar en: ligeramente sódicos, medianamente sódicos, fuertemente sódicos y extremadamente sódicos, ver cuadro 2.3.1.

Cuadro 2.3.1. Clasificación de los suelos sódicos, ref 5.

Clase	Porcentaje de sodio intercambiable, PSI
Ligeramente sódicos	7.0 - 15.0
Medianamente sódicos	15.1 - 20.0
Fuertemente sódicos	20.1 - 30.0
Extremadamente sódicos	más de 30.0

En estos suelos las arcillas se dispersan, son arrastradas por el agua de lavado y pueden acumularse a poca profundidad, formando una capa compacta de estructura prismática o columnar poco permeable. La capa superior presenta textura gruesa y quebradiza. En los suelos de elevado PSI, la materia orgánica se dispersa y disuelve, depositándose en la superficie, a la que da un color oscuro característico, dando origen a la denominación de "álcali negro".

c). Suelos salino-sódicos

Este tipo de suelos presenta una conductividad eléctrica mayor de 4 mmhos/cm a 25°C, y el porcentaje de sodio intercambiable es mayor del 15 por ciento. Siempre que contengan un exceso de sales, su apariencia y propiedades son similares a la de los suelos salinos. En este caso, el pH raramente es mayor de 8.5, permaneciendo floculadas las partículas del suelo. Si el exceso de sales solubles es lavado, las propiedades de estos suelos pueden cambiar notablemente, llegando a ser idénticas a las de los suelos sódicos.

A medida que la concentración de sales disminuye en la solución, parte del sodio intercambiable se hidroliza para formar hidróxido de sodio, que a su vez, con el CO_2 presente en la atmósfera del suelo puede formar Na_2CO_3 . En cualquier caso, el lavado de un suelo puede hacerlo mucho más alcalino (pH mayor de 8.5), provocando con esto que las partículas coloidales se dispersen de la misma manera que en los suelos sódicos. Cuando los suelos salino-sódicos contienen yeso, éstos al ser lavados, se disuelve el calcio, reemplazando de esta forma al sodio adsorbido, con lo cual el lavado se produce sin deterioro de la estructura del suelo.

2.4 CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO

De acuerdo al hecho de que una de las causas de la salinidad de los suelos, en las áreas de riego, es el agua con que se riega; entonces resulta lógico pensar en la gran importancia que tiene la determinación de la calidad del agua a utilizar con dicho propósito. Los criterios usuales en la determinación de la calidad del agua incluye, entre otros parámetros: 1) la concentración total de sales solubles, 2) la concentración relativa del sodio con respecto a otros cationes, 3) la concentración de boro u otros elementos que puedan ser tóxicos, y 4) bajo ciertas condiciones, la concentración de bicarbonatos con relación a la concentración de calcio más magnesio.

2.4.1 Concentración total de sales solubles

La concentración total de sales solubles en las aguas de riego, para fines de diagnóstico y clasificación, se puede expresar, al igual que en los suelos, en términos de conductividad eléctrica, la cual se puede determinar en forma rápida y precisa.

En general, las aguas cuya conductividad eléctrica sea menor de 750 micromhos/cm son adecuadas para el riego, por lo que respecta a sales, aun cuando los cultivos sensibles pueden ser afectados si se usan aguas cuya conductividad varíe entre 250 y 750 micromhos/cm.

Es común que se utilicen aguas con conductividad eléctrica varía entre 750 y 2,250 micromhos/cm, obteniéndose con ellas el crecimiento adecuado

de las plantas, siempre y cuando haya un buen manejo del suelo y un drenaje eficiente. Sin embargo, las condiciones de salinidad se presentarán si el lavado y drenaje no son adecuados. El empleo de aguas con conductividad eléctrica mayor de 2,250 micromhos/cm es una excepción, teniéndose rara vez buenos resultados. Únicamente los cultivos más tolerantes a las sales se pueden desarrollar bien cuando se riegan con este tipo de agua, y siempre que se aplique en abundancia y sea adecuado el drenaje del subsuelo.

Es evidente que las propiedades de transmisión del agua, el drenaje del suelo y la tolerancia a las sales del cultivo, son factores importantes en la evaluación de las aguas para riego desde el punto de vista de su concentración total de sales.

2.4.2 Concentración relativa del sodio con respecto a otros cationes

Las altas concentraciones de sodio son indeseables en el agua porque éste se adsorbe en los coloides del suelo, causando la dispersión de los agregados, lo cual sella los poros, provocando con esto que el suelo sea impermeable al flujo del agua. La tendencia del sodio para aumentar su proporción en los lugares de intercambio, a expensas de otros cationes, se estima por la proporción entre el contenido de sodio y calcio más magnesio en el agua, lo cual se expresa de la siguiente manera:

$$\text{RAS} = \text{Na}^+ / \sqrt{(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})/2} \quad 2.4.2.1$$

donde

Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} : representan las concentraciones, de los iones respectivos, meq/l.

En la *figura 2.4.2.1* se presenta un nomograma para determinar el valor de la RAS del agua para riego.

La *figura 2.4.2.2* muestra el nomograma a partir del cual se clasifican las aguas para riego; este asocia la conductividad eléctrica, en micromhos por centímetro, y la relación de adsorción de sodio.

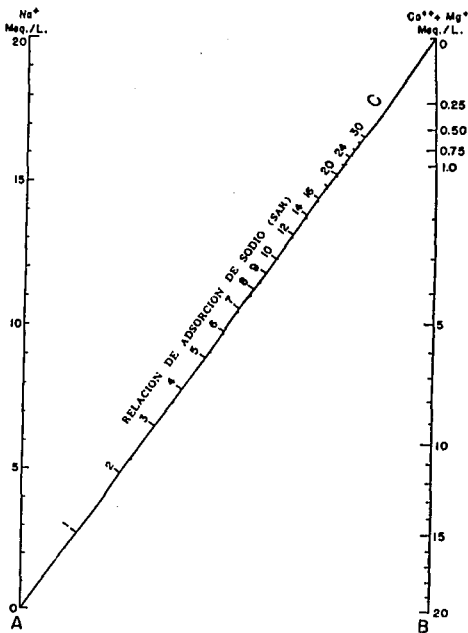


Figura 2.4.2.1. Nomograma para determinar el valor de la Relación de Adsorción de Sodio del agua para riego, ref 4.

Para usar el nomograma de la figura 2.4.2.2 es necesario conocer la conductividad eléctrica y las concentraciones de sodio y (calcio + magnesio) del agua. Cuando únicamente se conoce el valor del (calcio + magnesio), el sodio puede calcularse de la siguiente manera:

$$Na^+ = (CE \times 10^6 / 100) - (Ca^{++} + Mg^{++}) \quad 2.4.2.2$$

Inversamente, si sólo se conoce el valor del sodio, el calcio + magnesio puede calcularse con la ecuación 2.4.2.3.

$$(Ca^{++} + Mg^{++}) = (CE \times 10^6 / 100) - Na^+ \quad 2.4.2.3$$

Las concentraciones iónicas se expresan en miliequivalentes por litro.

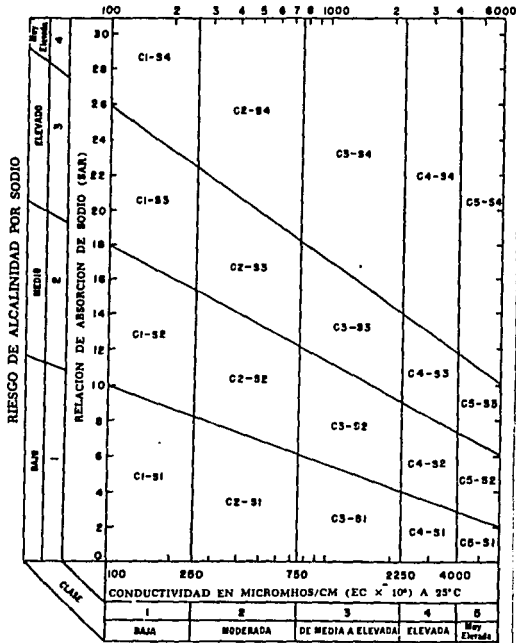


Figura 2.4.2.2. Diagrama para la clasificación de las aguas de riego, basada en el contenido total de sales (CE) y el contenido relativo de sodio (RAS), ref. 4.

La relación de adsorción de sodio (RAS) puede calcularse con la ecuación 2.4.2.1 que define su valor o bien, usando el nomograma de la figura 2.4.2.1. Usando los valores de la RAS y la CE como coordenadas, se ubica el punto correspondiente en el diagrama, donde su ubicación permite determinar la clasificación de calidad del agua.

2.4.3 Concentración de boro

El boro se encuentra en casi todas las aguas naturales y su concentración varía desde trazas hasta varias partes por millón. Este elemento proviene de la disolución de suelos y rocas, en especial las de origen ígneo. El agua de zonas térmicas y especialmente aquellas que se

encuentran en áreas de actividad volcánica reciente, pueden contener altas concentraciones de boro. Puede deberse en ocasiones, a contaminación por desperdicios. especialmente donde se usan detergentes que continen boratos.

Este elemento es esencial para el crecimiento de las plantas, pero demasiado tóxico cuando excede apenas ligeramente el nivel óptimo. La deficiencia de boro produce síntomas apreciables en muchas especies. Así por ejemplo, cuando se riega con aguas que contengan 1 ppm de boro, los limoneros muestran daños definidos y a veces económicamente importantes, en tanto que la alfalfa logra su desarrollo máximo si el agua de riego tiene de 1 a 2 ppm de boro.

Las concentraciones tóxicas de boro que se encuentran en algunas aguas de riego obligan a tener presente a este elemento para establecer su calidad. Scofield (ref 9) propuso los límites señalados en el cuadro 2.4.3.1.

Cuadro 2.4.3.1. Límites permisibles de boro para las aguas de riego, ref 4.

Clase por boro	Cultivos sensibles p.p.m.	Cultivos semitolerantes p.p.m.	Cultivos tolerantes p.p.m.
1	<0.33	<0.67	<1.00
2	0.33 a 0.67	0.67 a 1.33	1.00 a 2.00
3	0.67 a 1.00	1.33 a 2.00	2.00 a 3.00
4	1.00 a 1.25	2.00 a 2.50	3.00 a 3.75
5	>1.25	>2.50	>3.75

El boro con frecuencia se presenta en concentraciones tóxicas junto con contenidos altos de otras sales que dan origen a los suelos salinos. El boro puede ser lavado del suelo, pero si desde un principio las concentraciones son elevadas, aún cuando la concentración de las otras sales se reduzca a un nivel de relativa seguridad, puede quedar en el suelo una cantidad de boro suficiente para causar problemas a las plantas. En conclusión, el contenido de boro de los suelos salinos se debe determinar como parte de un estudio de salinidad.

2.4.4 Concentración de bicarbonatos con relación a la concentración de calcio más magnesio

En aguas ricas en iones bicarbonato, hay la tendencia del calcio y del magnesio a precipitarse en forma de carbonatos, a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. Esta reacción no se completa totalmente en circunstancias ordinarias, pero a medida que va ocurriendo, las concentraciones de calcio y magnesio se van reduciendo, aumentando así la proporción relativa de sodio.

Según Eaton (ref 9) puede concluirse que las aguas con más de 2.5 meq/l de carbonato de sodio residual, no son buenas para el riego. Aguas que contienen de 1.25 a 2.5 meq/l son dudosas y, las que contienen menos de 1.25 meq/l, se pueden considerar buenas. Se estima que las buenas prácticas de manejo y la aplicación de mejoradores químicos, podrían permitir el uso de las aguas dudosas para riego. Estas conclusiones están basadas en datos muy limitados y tienen carácter orientador únicamente.

2.5 MANEJO Y RECUPERACIÓN DE LOS SUELOS SALINOS

2.5.1 Manejo de los suelos salinos

Como no siempre es posible o práctico eliminar todas las sales de estos suelos, entonces se hace indispensable llevar a cabo un manejo adecuado de estos, para así minimizar el daño a los cultivos por la sal. En el caso de los suelos sódicos, antes de ser explotados, parte del sodio intercambiable debe ser removido; mientras que en el caso de los suelos pocos salinos, un control de la calidad del agua, técnicas adecuadas de siembra y la selección de cultivos tolerantes, son esenciales para su redituable utilización en la agricultura.

2.5.1.1 Riego y drenaje de suelos salinos

Anteriormente se mencionó que las causas por las cuales se produce la salinización de los suelos regados en la agricultura, son la calidad del agua utilizada y el mal drenaje superficial e interno que tienen estos suelos. Es así que, para el manejo y recuperación de estos suelos es primordial tomar en cuenta dos aspectos. El primero, contar con agua suficiente y de buena calidad físicoquímica en lo posible; o en caso

contrario, suministrar la suficiente cantidad para asegurar un buen lavado de las sales. El otro aspecto consiste en proveer al suelo de un drenaje artificial que permita drenar o lavar el exceso de agua, y con esto el exceso de sales originalmente contenidas en el suelo, así como las suministradas por el agua de riego, o bien las contenidas en el agua del manto freático; evitando con esto que se produzca la acumulación de sales en la zona radicular.

Un aspecto importante del manejo de suelos salinos mediante el riego, es el mantener un alto contenido de agua, cerca de la capacidad de campo, para diluir las sales y disminuir así sus efectos tóxicos y osmóticos. Si el suelo es regado ligeramente pero con frecuencia, para mantenerlo a un alto contenido de humedad, durante la germinación (sensitiva a la sal) y el estado de plántula, las plantas son capaces de sobrevivir a un estado maduro de más tolerancia.

Puede decirse, en general, que los métodos de riego y aquellas prácticas que permitan uniformidad en su aplicación y el movimiento hacia abajo, del agua a través del suelo, favorecen en gran parte el control de la salinidad. Métodos que almacenan el agua o la hacen correr sobre la superficie, como por ejemplo el riego por inundación o por melgas, aseguran una mayor uniformidad de aplicación que otros métodos como por ejemplo el riego por surcos. Algunas investigaciones han demostrado que con el riego por surcos se concentran excesos de sales en los caballones de los mismos. En la *figura 2.5.1.1.1* se muestra la distribución de sales resultado del riego por surcos en un lote experimental que se salinizó al 0.2 por ciento.

Por último, se puede recomendar que el lavado de las sales del suelo se lleve a cabo periódicamente, cuando no haya cultivos establecidos en el terreno, pero sí agua de riego disponible.

2.5.1.2 Posición de la siembra

Dado que durante el proceso de evaporación y/o evapotranspiración la sal se mueve horizontal y verticalmente con el agua, pudiendo acumularse en la superficie del suelo o en la cresta de los surcos; se puede causar una inhibición de la germinación de las semillas por el efecto osmótico

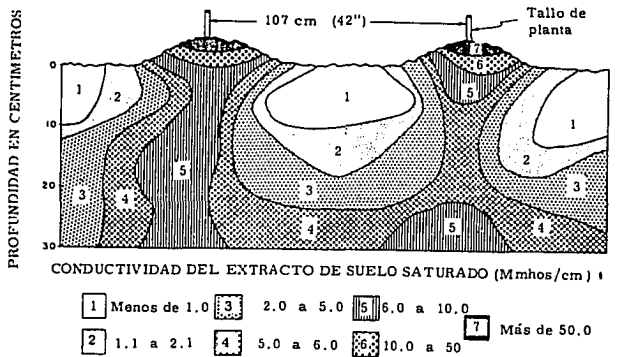


Figura 2.5.1.1.1. Distribución de la sal con riego por surcos. Suelo con salinidad inicial de 2% e irrigado con agua de salinidad media, ref 4.

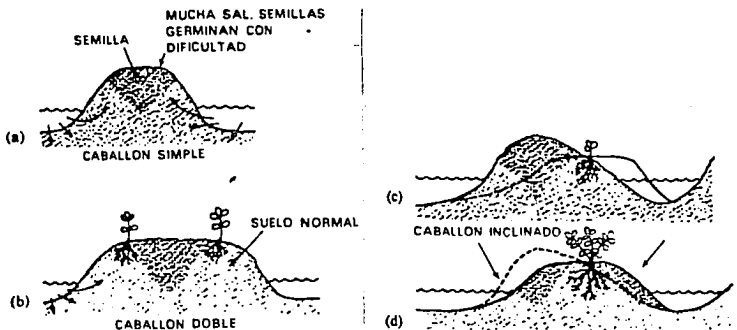


Figura 2.5.1.2.2. Métodos de preparación de la cama de siembra para reducir los efectos de las sales solubles en las plantas, ref 4.

de las sales. En la figura 2.5.1.2.2, se muestran cortes de secciones de surcos y posiciones para la siembra, que se practican para evitar el daño por acumulación de sal en la superficie. Obsérvese que estos métodos evitan los centros de los caballones anchos y las crestas de los caballones angostos, donde se concentra más la sal, en el riego por surcos. El riego por aspersión elimina algunos de estos problemas, lavando más sal, a mayor profundidad, en el perfil del suelo.

2.5.1.3 Selección de los cultivos

En la selección de los cultivos los aspectos más importantes son:

- a) tolerancia a la salinidad del suelo.
- b) adaptación al clima y características del suelo, y
- c) valor económico.

El riesgo de que un cultivo no prospere o se pierda, será menor mientras éste sea más tolerante a la sal. En el cuadro 2.5.1.3.1 se muestra la tolerancia de algunos cultivos a la sal contenida en el suelo.

2.5.2 Recuperación de suelos salinos

El principal objetivo de la recuperación de suelos salinos, es mantener o transformar las características estructurales del perfil del suelo, para obtener las condiciones que faciliten la solubilidad y el transporte de las sales fuera de la zona ocupada por las raíces de las plantas cultivadas.

Ahora bien, la metodología a seguir en la recuperación de los tres tipos de suelos salinos antes descritos, va a ser diferente, ya que como se dijo estos muestran características físicas y químicas diferentes entre sí.

2.5.2.1 Recuperación de suelos con problemas de sales

Los suelos salinos son relativamente fáciles de recuperar para la agricultura, si se dispone de cantidades adecuadas de agua para riego con poca sal, y es posible un buen drenaje interno y superficial.

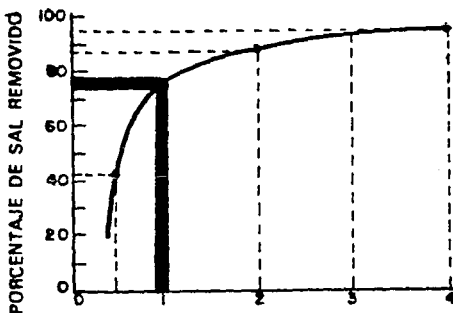
La cantidad de agua requerida para remover las sales del suelo, depende de muchos factores tales como, qué tan profundo deben ser lavadas las sales, qué porcentaje de sales va a ser removido, y cómo se hará el lavado (con encharcado constante, o riego intermitente). Una guía general, es que con agua estancada se requieren cerca de 30 cm de agua para remover el 70 a 80 por ciento de la sal, por cada 30 cm de profundidad de suelo a ser lavados (figura 2.5.2.1.1). Adiciones intermitentes de agua son más eficientes y reducen las cantidades necesarias de agua en un 70 por ciento, comparativamente a la necesaria en el sistema de encharcamiento, o en métodos de lavado continuo.

Cuadro 2.5.1.3.1. Tolerancia relativa de los cultivos a las sales, ref. 4.

Frutales		
Muy tolerantes	Medianamente tolerantes	Poco tolerantes
Palma datilera	Granada Higuera Olivo Vid	Peral Manzano Naranja Toronja Ciruelos Almendro Albaricoque Melocotón Fresa Limonero Aguacate
Hortalizas		
CE _e x 10 ³ = 12 Remolacha Col rosada Espárragos Espinacas	CE _e x 10 ³ = 10 Jitomates Brécol Col Pimiento Coliflor Lechuga Maíz dulce Papas Zanahoria Cebolla Chicharos Calabaza Pepinos CE _e x 10 ³ = 4	CE _e x 10 ³ = 4 Rábano Apio Ejotes
CE _e x 10 ³ = 10		CE _e x 10 ³ = 3
Cultivos comunes		
CE _e x 10 ³ = 16 Cebada (grano) Remolacha azucarera Colza Algodón	CE _e x 10 ³ = 10 Centeno (grano) Trigo (grano) Avena (grano) Arroz Sorgo (grano) Maíz Linaza Girasol Higuerilla CE _e x 10 ³ = 6	CE _e x 10 ³ = 4 Alubias
CE _e x 10 ³ = 10		

Continuación, Cuadro 2.5.1.3.1. Tolerancia relativa de los cultivos a las sales, ref. 4.

Plantas forrajeras		
Muy tolerantes	Medianamente tolerantes	Poco tolerantes
$CE_e \times 10^3 = 18$ Zacatón alcalino Zacate salado Zacate alcalino de coquito Zacate bermuda Centeno silvestre del Canadá Cebada para heno Cuernecillo $CE_e \times 10^3 = 10$	$CE_e \times 10^3 = 12$ Trébol blanco Trébol amarillo Zacate inglés perenne Trébol fresa Zacate Dallis Zacate Sudán Trébol Hubam Alfalfa California común Festuca alta Centeno para heno Trigo para heno Avena para heno Grama azul Festuca Hierba cinta Trébol grande Bromo suave Veza lechosa Cicer Trébol agrio Veza lechosa $CE_e \times 10^3 = 6$	$CE_e \times 10^3 = 4$ Rábano Apio Ejotes



Pies de agua necesarios para lavar un pie de suelo al porcentaje de sal indicado.

Figura 2.5.2.1.1. Cantidad estimada de agua normal (beje en sales) requerida para mover sales de suelos salinos, ref 3.

2.5.2.2 Recuperación de suelos con problemas de sodio y sales

La recuperación de suelos sódicos es bastante diferente a la recuperación de los suelos salinos. En suelos sódicos, el sodio intercambiable es tan abundante que el suelo es casi impermeable al agua. Pero aún así, si el agua se moviera hacia abajo libremente en los suelos sódicos, no lavarían por sí sola el exceso de sodio intercambiable. El sodio debe ser primero reemplazado por otro catión y luego lavado de la zona radicular. Es importante que los productos se retiren en este orden, de otro modo, si se retiran primeramente las sales solubles, se puede deteriorar la estructura del suelo y entonces resultará extremadamente difícil poder hacer algo.

Las determinaciones del sodio intercambiable y de la capacidad de intercambio catiónico, son guías muy valiosas para calcular las cantidades de mejoradores químicos que se requieren para reducir el porcentaje de sodio intercambiable de los suelos sódicos a los niveles requeridos.

El calcio es el elemento más comúnmente utilizado para reemplazar el sodio en los suelos sódicos. De todos los compuestos de calcio, el sulfato de calcio (yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es considerado el mejor para este propósito. El calcio solubilizado del yeso reemplaza al sodio, dejando sulfato de sodio soluble en el agua, el cual es lavado posteriormente.

El requerimiento de yeso (RY), es la cantidad de yeso necesaria para recuperar el suelo, y se define como:

$$RY = 1.72(N_{ax})$$

2.5.2.2.1

donde

RY: toneladas de yeso por $4,047 \text{ m}^2$.

N_{ax} : miliequivalentes de sodio intercambiable a ser reemplazados por calcio.

Una innovación significativa en la recuperación de suelos sódicos y salino-sódicos, es el uso inicial de agua salada para el lavado. Tal uso suena paradójico, pero tiene una base científica. Un alto contenido de sal en el agua mantiene floculados a los suelos sódicos. Los

flóculos dejan grandes poros, permitiendo la penetración del agua de lavado. Además, el agua a usar para el primer riego puede ser moderadamente salada. Después que es removido la mayoría del sodio intercambiable por el calcio contenido, ya sea en las sales mismas del suelo, en el agua de riego, o el proporcionado a través de la adición de yeso; el agua de bajo contenido de sal puede utilizarse para el lavado final.

3 DESCRIPCION DEL MODELO MATEMATICO

De acuerdo con la problemática planteada en el capítulo anterior, es clara la necesidad de disponer de herramientas que permitan cuantificar el comportamiento de la sal en el suelo, y por ende su efecto en la producción final de los cultivos.

De esta manera, en términos generales, el modelo aquí propuesto pretende determinar la producción de cultivos, a partir de la simulación de la variación en el contenido de agua y concentración de sal, en el perfil del suelo. Dicho modelo está basado en los trabajos reportados en las referencias 1, 2 y 6.

A continuación se presentan las teorías e hipótesis en las que se basa el modelo, así como las ecuaciones que utiliza para simular el movimiento del agua, el transporte de sal y la producción de cultivos.

3.1 MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO

Supóngase que se tiene un estrato de suelo como el que se muestra en la figura 3.1.1. Aceptando que la extensión lateral de ese estrato sea muy grande, el movimiento del agua dentro del suelo será principalmente vertical. Si se considera un volumen unitario de dicho suelo, según la ley de Darcy se puede establecer que la velocidad del agua está definida como

$$q = -K \frac{dH}{dZ} \quad 3.1.1$$

donde

q : velocidad con la que pasa el agua a través de un volumen de suelo, m/s.

K : conductividad hidráulica, m/s.

dH/dZ : cambio del potencial hidráulico (H) entre los dos puntos en que ocurre el movimiento del agua (adim), siendo Z la distancia vertical en un eje coordenado como en la figura 3.1.1.

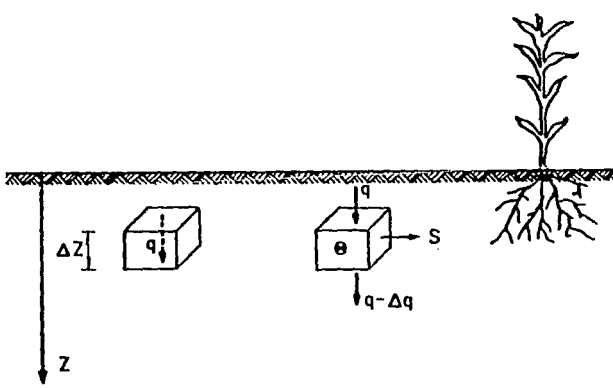


Figura 3.1.1. Movimiento del agua en el suelo, considerando un volumen unitario, ref. 2.

3.1.1 Extracción del agua del suelo por las plantas

Ahora bien, suponiendo que el suelo tiene un cierto contenido de humedad

(W) y que existe una extracción de humedad (S) efectuada por las raíces de las plantas, se puede establecer la ecuación de continuidad de la siguiente manera

$$dW/dt = - (dq/dZ) - S \quad 3.1.1.1$$

donde

dW/dt: cambio de la humedad real (W, m³/m³, base peso) del suelo, en el tiempo (t, s).

dq/dZ: cambio de la velocidad del agua en la dirección vertical, (q, m/s; Z, m).

S: extracción radicular de la humedad del suelo, m.

En otras palabras, el cambio de la humedad del suelo a través del tiempo se debe al movimiento vertical del agua y a la extracción radicular.

Por otra parte, el potencial total de la humedad en un suelo se puede representar con la siguiente ecuación

$$\Psi = \psi + \psi_g + \psi_o + \psi_a \quad 3.1.1.2$$

donde

Ψ: potencial total de humedad, mca.

ψ: potencial mátrico. Está determinado principalmente por la interacción de las fuerzas eléctricas de las partículas de agua y suelo, mca.

ψ_g: potencial gravitatorio. Depende de la posición del punto en el suelo respecto a un nivel de referencia arbitrario, mca.

ψ_o: potencial osmótico. Está en función de las concentraciones salinas, mca.

ψ_a: potencial de presión. Depende de la presión del aire contenido en el suelo, mca.

Considerando que ψ_a = 0, dado que la presión del aire en el suelo es, salvo en casos especiales, la atmosférica; y si además se considera que ψ_o = 0, ya que esta se tomará en cuenta posteriormente; entonces esto permite simplificar la ecuación 3.1.1.2, de la siguiente manera

$$\Psi = H = \psi - Z \quad 3.1.1.3$$

donde

H: potencial hidráulico o carga hidráulica.

$\psi_g = -Z$: Z, representa la posición en un eje coordenado, como el de la figura 3.1.1.

Si se sustituye la ecuación 3.1.1.3 en la 3.1.1, se obtiene

$$q = -K(dH/dZ) = -K(d\psi/dZ - 1) \quad 3.1.1.4$$

y al sustituir esta última en la ecuación 3.1.1.1

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dZ} \left[K \left[\frac{d\psi}{dZ} - 1 \right] \right] - S \quad 3.1.1.5$$

Puesto que se puede establecer en laboratorio la relación entre la humedad real (W) y la tensión (ψ) de la humedad de cada suelo, es posible admitir que $W = f(\psi)$, si ésta es continua entonces

$$dW/d\psi = C(\psi) \quad 3.1.1.6$$

por tanto,

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW}{d\psi} \frac{d\psi}{dt} = C(\psi) \frac{d\psi}{dt} \quad 3.1.1.7$$

Sustituyendo la ecuación 3.1.1.7 en la 3.1.1.5, se tiene

$$C(\psi) \frac{d\psi}{dt} = \frac{d}{dZ} \left[K \left[\frac{d\psi}{dZ} - 1 \right] \right] - S \quad 3.1.1.8$$

En la ecuación 3.1.1.8, el término S es difícil de representar, pues depende de varios factores, tales como:

- a). Distribución de la humedad en el suelo.
- b). Profundidad y densidad de la raíz, las cuales cambian en el tiempo.
- c). Condiciones de aireación del suelo.
- d). Posición del nivel freático.
- e). Metabolismo propio de la planta, que a su vez depende de la distribución de nutrientes, las condiciones atmosféricas, la incidencia de plagas, la variedad del cultivo, etc.

Se ha logrado representar analíticamente (ref 2) la variación del sistema radicular en el tiempo y perfil del suelo, sin embargo aún no se

dispone de un criterio unificado ni general para tal representación. Esto se comprende fácilmente si se piensa en la dificultad de cuantificar todos los factores antes mencionados.

En el modelo se propone un criterio para considerar la extracción radicular igual a la evapotranspiración real, que puede ser calculada, y se expresa de la siguiente manera: La cantidad de humedad extraída $S(\psi_1)$, en un estrato de suelo ΔZ (ver figura 3.1.1.1), depende de la tensión de la humedad en el suelo ψ_1 y de la densidad radicular (DR) contenida en dicho estrato, por lo cual se puede establecer que

$$S(\psi_1) = f(\psi_1, DR, \Delta Z) \quad 3.1.1.9$$

donde

- $S(\psi_1)$: cantidad de humedad extraída, en lámina, m.
- ψ_1 : tensión de la humedad en el suelo, mca.
- DR: profundidad radicular, m.
- ΔZ : estrato de suelo, m.

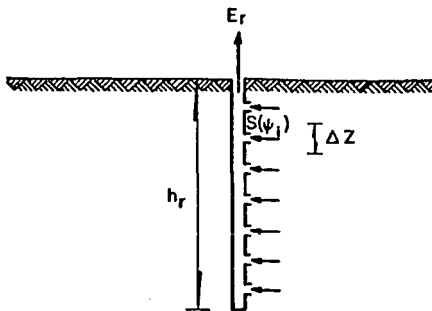


Figura 3.1.1.1. Extracción del agua del suelo por parte de la raíz del cultivo, ref. 2.

Dado que de la cantidad total de agua que extrae la raíz, sólo una porción mínima permanece en la planta (conformando su estructura), siendo la gran mayoría transpirada, se puede proponer

$$\int_{z=0}^{z=h_r} S(\psi_1) dz = E_r \quad 3.1.1.10$$

donde

Er: evapotranspiración real del cultivo.

hr: profundidad radicular.

En la referencia 6, se plantea un modelo matemático para simular la producción de cultivos, parte del cual establece que, conocida la cantidad de humedad en el suelo (W), se puede determinar la tensión de la humedad (ψ), a través de la curva W contra ψ característica de dicho suelo; luego, conocida ψ y utilizando el valor de la evapotranspiración potencial ETP para el día de análisis, se puede precisar la relación Er/ETP mediante las gráficas de la figura 3.1.1.2 y por consiguiente, conocer Er para esas condiciones.

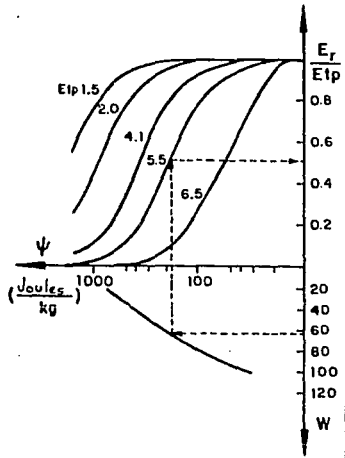


Figura 3.1.1.2. Relación entre la tensión de la humedad del suelo (ψ) y el cociente Er/ETp, ref 2.

Ahora bien, de la ecuación 3.1.1.10, haciendo ΔZ constante, ésta se puede integrar numéricamente de la siguiente manera

$$\sum_{i=1}^n S(\psi_i) \Delta Z_i = E_r \quad 3.1.1.11$$

siendo n el número de intervalos ΔZ ; en que se dividió la profundidad radicular. Es decir

$$hr = \sum_{i=1}^n \Delta Z_i \quad 3.1.1.12$$

Si

$$ETp = \frac{ETp}{hr} \sum_{i=1}^n \Delta Z_i \quad 3.1.1.13$$

que desarrollada es

$$ETp = \frac{ETp}{hr} \Delta Z_1 + \frac{ETp}{hr} \Delta Z_2 + \dots + \frac{ETp}{hr} \Delta Z_n \quad 3.1.1.14$$

se puede establecer que, para cada ΔZ_i , la evapotranspiración potencial será

$$ETp = \frac{ETp}{hr} \sum_{i=1}^n \Delta Z_i \quad 3.1.1.15$$

y dado que la evapotranspiración real está en función de la humedad del suelo, se puede establecer para cada ΔZ_i la siguiente ecuación

$$Er_i \propto (Er/ETp)_i ETp_i \quad 3.1.1.16$$

donde el coeficiente de proporcionalidad α se supone representa la densidad radicular (DR) en el espesor ΔZ_i , de modo que

$$Er_i = DR_i (Er/ETp)_i ETp_i \quad 3.1.1.17$$

Además, se considera que DR_i es un porcentaje (adimensional) de la cantidad total de raíz, expresada en gramos de masa radicular, o bien con algún otro equivalente; como por ejemplo, el diámetro de las raíces. Esto significa que

$$\sum_{i=1}^n DR_i = 1 \quad 3.1.1.18$$

y como

$$Er = \sum_{i=1}^n Er_i \quad 3.1.1.19$$

por lo que, sustituyendo la ecuación 3.1.1.17 en la 3.1.1.19, se tiene

$$Er = \sum_{i=1}^n DR_i (Er/ETp)_i \quad ETp_i \quad 3.1.1.20$$

Finalmente, igualando las ecuaciones 3.1.1.11 y 3.1.1.20, resulta

$$\sum_{i=1}^n S(\psi_i) \Delta Z_i = \sum_{i=1}^n DR_i (Er/ETp)_i \quad ETp_i \quad 3.1.1.21$$

Se hace notar que $(Er/ETp)_i$ depende únicamente de ψ_i y ETp_i , por lo que

$$S(\psi_i) = DR_i (Er/ETp)_i \quad (ETp_i) \quad 3.1.1.22$$

La ecuación 3.1.1.22 es la relación funcional propuesta en la expresión 3.1.1.9 la cual sólo depende de ψ_i ; por lo tanto, la ecuación general 3.1.1.8 será

$$C(\psi)d\psi/dt = d[K(d\psi/dZ - 1)]/dZ - S(\psi) \quad 3.1.1.23$$

Siendo ésta la ecuación que representa el movimiento del agua en el suelo, expresada únicamente en función de la tensión de humedad.

3.2 MOVIMIENTO Y ACUMULACIÓN DE SALES EN EL SUELO

El movimiento de las sales solubles del suelo ocurre mediante dos procesos principales: convección y difusión (ref 1). La difusión es el movimiento molecular o iónico de un soluto, dentro de la solución del suelo; mientras que la convección es el movimiento volumétrico de la solución del suelo (junto con el soluto) a través del perfil de dicho

suelo.

3.2.1 Transporte por difusión

Esta forma de transporte se da en respuesta a un gradiente de concentración de un ión particular en la solución del suelo.

La difusión de un soluto en agua es descrita por la primera ley de Fick, como

$$J_d = - D_0 \frac{dC}{dx} \quad 3.2.1.1$$

donde

J_d : cantidad de soluto difundido a través de un área unitaria, cm^2 , por unidad de tiempo, s.

D_0 : coeficiente de difusión del soluto en el agua, cm^2/s .

C : concentración del soluto, g/cm^3 de solución, o mol/cm^3 .

x : distancia, cm a lo largo de la dirección de la malla del movimiento del soluto.

Como los constituyentes de la matriz del suelo son un medio poroso cargado eléctricamente, el coeficiente de difusión efectivo D_p para cualquier ión dado, es menor que el coeficiente equivalente D_0 en un sistema de agua pura. Las relaciones entre D_p y D_0 pueden ser expresadas como

$$D_p = \theta (L/L_e)^2 \alpha \gamma D_0 \quad 3.2.1.2$$

donde

D_p : coeficiente efectivo de difusión, cm^2/s

θ : contenido volumétrico de agua en el suelo, cm^3 de agua/ cm^3 de suelo.

$(L/L_e)^2$: factor de tortuosidad.

α : coeficiente que explica la reducción de la viscosidad del agua debido a la presencia de las partículas de la matriz del suelo.

γ : coeficiente que explica el efecto de retardo de la exclusión de anión en el flujo, en la vecindad de las cargas negativas de las partículas del suelo.

Los factores θ , L/L_e , α y γ son menores a la unidad, y por lo tanto el coeficiente efectivo de difusión D_p es menor que el coeficiente equivalente de difusión D_0 en agua libre de soluto.

Por otra parte, algunos investigadores han demostrado que el coeficiente de difusión de soluto es una función exponencial positiva del contenido de agua (θ) y, para propósitos prácticos, es independiente de la concentración. La ecuación 3.2.1.3 representa matemáticamente esta relación

$$D_p(\theta) = D_0 a e^{b\theta} \quad 3.2.1.3$$

donde

D_p : coeficiente de difusión efectiva.

a y b: constantes empíricas, donde a puede tomar valores en el intervalo de 0.005-0.001, dependiendo del área superficial del suelo estudiado (arena-limoso a arcilloso), y $b = 10$.

Esta relación simplificada de $D_p(\theta)$ fue determinada para aplicarse al contenido de agua correspondiente a un intervalo de tensiones entre 0.30 y 15 bars, el cual es suficiente para la mayoría de los casos donde la difusión puede ser importante. De esta manera se toma en cuenta el efecto del contenido de agua en el suelo, sobre la difusión de un ión.

Considerando lo anterior, la primera ley de Fick puede ser escrita como

$$J_d = -D_0 \theta (L/L_e)^2 \alpha \gamma \frac{dC}{dx} = -D_p(\theta) \frac{dC}{dx} \quad 3.2.1.4$$

donde

J_d : cantidad de material (en unidades de masa o volumen) transportada por unidad de tiempo.

C: concentración del ión o soluto en la solución del suelo, meq/l.

$D_p(\theta)$: puede ser calculada con la ecuación 3.2.1.3.

3.2.2 Transporte por convección

En general, la difusión molecular se lleva a cabo junto con el transporte convectivo, y cada proceso contribuye a la dispersión final del soluto. Comúnmente se acepta que el transporte convectivo de las sales se realiza a partir de la velocidad promedio de la solución del suelo, llevándose a cabo simultáneamente con la dispersión mecánica o hidráulica del soluto. Dicho transporte puede ser representado por la siguiente ecuación

$$D_h(V) = \lambda |V| \quad 3.2.1.5$$

donde

D_h : coeficiente de dispersión mecánica.

V : promedio de la velocidad del flujo intersticial, cm/s.

λ : constante experimental que depende de las características del medio poroso, cm.

Aquí también, se supone que se pueden tener relaciones similares en condiciones transitorias, o no saturadas.

Por otra parte, suponiendo que la cantidad total de soluto transportada por convección, a través de un área unitaria en la dirección del flujo (x), se puede obtener a partir de

$$J_h = -D_h(V) \frac{dC}{dx} + V\theta C \quad 3.2.1.6$$

donde

J_h : representa la cantidad total de soluto (g o mol) movido por convección a través de un área, en la unidad de tiempo, cm^2/s .

El primer término del lado derecho representa el movimiento del soluto debido a la dispersión, y el segundo término es el flujo debido al promedio de la velocidad del flujo.

3.2.3 Combinación de los transportes de difusión y convección

La unión del efecto de la difusión y convección en el movimiento del soluto, es derivado (ref 1) de la combinación de las expresiones matemáticas 3.2.1.3 y 3.2.1.5, obteniendo

$$J = - [\theta D_h(V) + D_p(\theta)] \frac{\partial C}{\partial x} + V\theta C = -\theta D(V, \theta) \frac{\partial C}{\partial x} + qC \quad 3.2.1.7$$

donde

- J: cantidad total de soluto movida por la combinación de la convección y la difusión (en unidades de masa).
- C: concentración del soluto de la solución del suelo.
- x: coordenada de la dirección del flujo.
- D: coeficiente combinado de difusión-dispersión, cm^2/s .
- q: flujo volumétrico específico de la solución, $\text{cm}^3/\text{cm}^2\text{-s}$.

Aunque la ecuación 3.2.1.7 es una aproximación, esta se usa en la práctica para propósitos de predicción de la distribución de la concentración de sal en el perfil del suelo.

Ahora bien, en suelos agrícolas los cambios en el contenido de agua debido a la infiltración, redistribución, evaporación, y transpiración, causan el movimiento simultáneo de agua y sal. Como las condiciones de flujo en estado estacionario ocurren muy pocas veces bajo condiciones naturales, una expresión matemática para el flujo unidimensional en condiciones transitorias, puede ser derivada a partir de la ecuación de continuidad o conservación de masa. Bajo estas condiciones, la tasa de cambio de soluto dentro de un suelo dado, puede ser igual a la diferencia entre la cantidad de soluto que entra y sale de dicho suelo.

Planteando un balance de masa para el flujo y la sal del suelo, y considerando el caso de un flujo vertical unidimensional, Bresler, et al, (ref 1) obtuvo la siguiente expresión

$$\frac{\partial}{\partial t} (Q + \theta C) = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(V, \theta) \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \frac{\partial (qC)}{\partial z} + S \quad 3.2.1.8$$

donde

- Q: concentración local (positiva o negativa) de soluto en la fase "adsorbida", meq/cm^3 de suelo, generalmente depende tanto de θ como de C.
- C: concentración en la fase de la solución, meq/cm^3 de solución de suelo.

- S: pérdida o ganancia debido a la toma de sal por las plantas, la adsorción, precipitación o disolución, meq/cm³.
- t: tiempo, h.
- z: coordenada espacial vertical, cm.
- θ: contenido volumétrico de agua, cm³/cm³.
- V: velocidad promedio del flujo; $V = q/\theta$, cm/h.
- D: coeficiente de difusión; $D = D_p + D_h$; donde $D_p = D_{0ae}^{b\theta}$ y $D_h = \lambda|V|$, cm²/h.
- q: flujo volumétrico de agua, cm³/cm²-h.

La ecuación 3.2.1.8 es la expresión matemática que representa el transporte del soluto dentro del suelo, considerando los procesos de difusión-convección bajo las condiciones antes descritas. Dicha ecuación se puede aplicar cuando se considera que el soluto interactúa o no, químicamente, con el suelo, así como cuando se tienen pérdidas o ganancias totales significativas de sal dentro del sistema. La solución matemática de la ecuación 3.2.1.8 puede ser empleada para simular problemas que consideren salinidad bajo condiciones naturales de suelo, y donde C representa la concentración total de sal o una concentración de ión específico, dentro o fuera de la disolución (adsorción o exclusión).

Ahora bien, cuando se consideran despreciables la precipitación, disolución y la toma de sal por parte de las raíces de las plantas (S), así como la adsorción y exclusión de iones de la matriz del suelo (Q); entonces, los términos S y Q de la ecuación 3.2.1.8 son eliminados, quedando ésta de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta C) = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(V, \theta) \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \frac{\partial (qC)}{\partial z} \quad 3.2.1.9$$

Esta última ecuación es la que se utiliza en el presente trabajo, para modelar numéricamente la variación de la concentración total de soluto (no reactivo con la matriz del suelo) en el perfil del suelo.

3.3 CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO Y SU EFECTO EN LA PRODUCCIÓN DE LOS CULTIVOS

En cuanto a la simulación de la producción de cultivos, el modelo matemático planteado en la referencia 6, considera que el crecimiento y/o la producción de un cultivo depende directamente de "un índice de esfuerzo" (tensión), realizado por éste, para extraer el agua contenida en el suelo.

Ahora bien, cuando no se atienden todas las necesidades de agua del cultivo, el déficit de ésta en la planta puede llegar hasta el punto que se vean afectados tanto el crecimiento como el rendimiento. Actualmente se acepta que una buena aproximación es aceptar que cualquier esfuerzo impide el crecimiento, es decir, cualquier desviación de Capacidad de Campo (CC) hacia Punto de Marchitez Permanente (PMP) altera el desarrollo del cultivo. El modelo acepta esta hipótesis, pero además supone que la razón o proporción de crecimiento se reduce proporcionalmente (linealmente) con la intensidad del esfuerzo, desde la unidad, cuando el cultivo realiza un "esfuerzo" mínimo (suelo a CC), hasta cero, cuando la relación entre la evapotranspiración real (Er) y la evapotranspiración potencial (ETp) vale 0.5. La ecuación de la recta, de la relación Er/ETp vs P propuesta, es la siguiente:

$$P_1 = 2 (Er/ETp)_1 - 1 \quad 3.3.1$$

donde

P_1 : producción del cultivo en el día i (en porcentaje), y donde $0 \leq P \leq 1$.

$(Er/ETp)_1$: relación entre la evapotranspiración real y la evapotranspiración potencial en el día i , en mm.

Por otra parte, se ha demostrado que el "esfuerzo" o tensión que realiza el cultivo para absorber agua del suelo, depende de la etapa de desarrollo en la que se encuentre, y de la tensión de la humedad en el suelo. Dicho efecto afectará en forma distinta tanto el desarrollo como la producción final del cultivo. El modelo considera lo anterior, pero además, supone que el efecto de la tensión en cada etapa del ciclo

vegetativo no repercute en las demás, y que la recuperación del cultivo al desaparecer la tensión o "esfuerzo" es rápida. Para tomar en cuenta esto, el ciclo vegetativo de los cultivos se divide en cuatro etapas (nacimiento, desarrollo vegetativo, floración y madurez), proponiéndose un coeficiente de ponderación para cada una de ellas, el cual dependerá del tipo de cultivo. En términos generales se pueden considerar los siguientes

nacimiento = 0.05
 desarrollo vegetativo = 0.30
 floración = 0.50
 madurez = 0.15

En el caso de cultivos forrajeros, dado que estos no parecen presentar etapas particularmente sensibles a las deficiencias de humedad, se asume por lo tanto que los coeficientes toman un valor igual a 0.25, para las cuatro etapas.

Dichos coeficientes son utilizados en la ecuación 3.3.2, para calcular el rendimiento de los cultivos, en cada una de las etapas fenológicas en las que se ha dividido el ciclo vegetativo de estos.

$$R_j = \frac{C_j \left[\sum P_i \right]_j}{N_j} \quad 3.3.2$$

donde

- R_j : rendimiento obtenido en la etapa j , en porciento.
- C_j : coeficiente de ponderación para la etapa j , adim.
- $(\sum P_i)_j$: suma de los porcentajes de crecimiento diario (i), para la etapa fenológica (j).
- N_j : número de días que dura la etapa fenológica, j .

Al final del ciclo vegetativo, el rendimiento total del cultivo se determina a partir de la siguiente ecuación

$$R = R' \left[\sum_{j=1}^m (C/N)_j \sum_{i=1}^{N_j} P_i \right] \quad 3.3.3$$

donde

R: rendimiento neto del cultivo, ton/ha.

R': rendimiento del cultivo, en ton/ha, correspondiente al 100% de aprovechamiento del cultivo.

m: número de etapas en que se divide el ciclo vegetativo.

C_j: coeficiente de ponderación para la etapa j.

N_j: número de días correspondiente a la etapa j.

P_j: rendimiento del cultivo en el día i, en porciento.

Por último, la representación gráfica de la interacción entre el contenido de agua en el suelo, el cociente E_r/ET_p y la producción de un cultivo, se muestra en la figura 3.3.1.

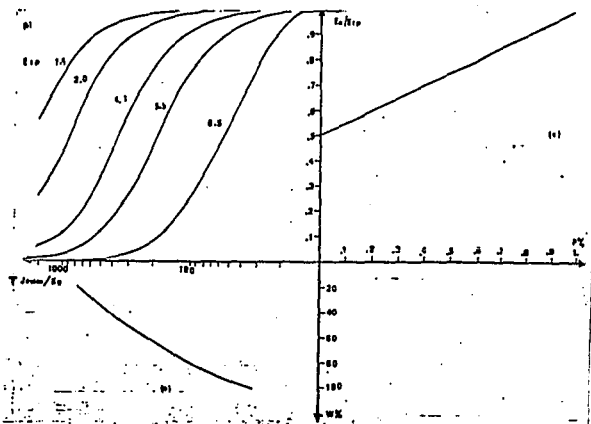


Figura 3.3.1. Representación gráfica de la relación de la tensión del suelo (ψ), el cociente E_r/ET_p y la producción de un cultivo, ref. 2.

3.4 ESQUEMA NUMÉRICO DE SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE DE SAL

Para resolver la ecuación 3.2.1.9 se utiliza un esquema de diferencias finitas. Según la malla de la figura 3.4.1, la ecuación 3.2.1.9 puede presentarse como:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} (\theta C)}_{\text{parte I}} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(V, \theta) \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \underbrace{\frac{\partial (qC)}{\partial z}}_{\text{parte II}} \quad 3.4.1$$

donde

C: concentración en la fase de la solución, meq/cm³ de solución de suelo.

t: tiempo, h.

z: coordenada espacial vertical, cm.

θ: contenido volumétrico de agua, cm³/cm³.

D: coeficiente de difusión; D = D_p + D_h; donde D_p = D₀ae^{bθ} y D_h = λ|V|, cm²/h.

V: velocidad promedio del flujo, V = q/θ, cm/h.

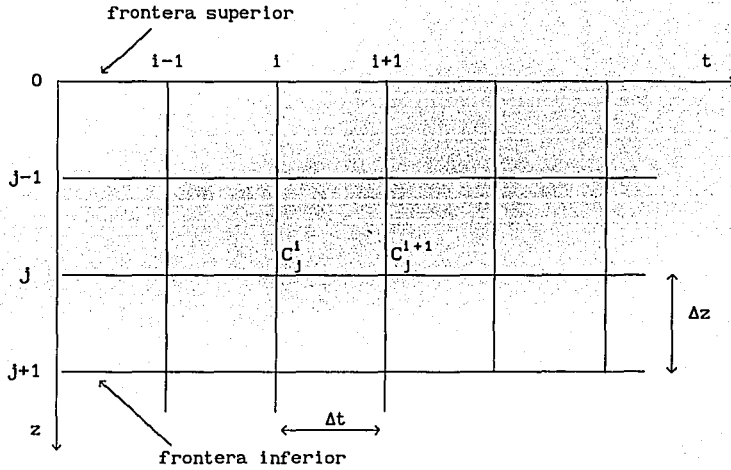
q: flujo volumétrico de agua, cm³/cm²-h.

Para la parte I de la ecuación 3.4.1 se tiene

$$\frac{\theta_j^{i+1} C_j^{i+1} - \theta_j^i C_j^i}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D \left[\left[\frac{C_{j+1}^{i+1} + C_{j+1}^i}{2\Delta z} - \frac{C_j^{i+1} + C_j^i}{2\Delta z} \right] - \left[\frac{C_j^{i+1} + C_j^i}{2\Delta z} - \frac{C_{j-1}^{i+1} + C_{j-1}^i}{2\Delta z} \right] \right] \right]$$

3.4.2a

Figura 3.4.1. Malla de cálculo.



La parte II de la ecuación 3.4.1 será

$$\begin{aligned}
 & - \frac{1}{\Delta z} \left[q_{j,j+1} \left[\frac{C_{j+1}^{i+1} + C_{j+1}^i + C_j^{i+1} + C_j^i}{4} \right] \right. \\
 & \quad \left. - q_{j-1,j} \left[\frac{C_j^{i+1} + C_j^i + C_{j-1}^{i+1} + C_{j-1}^i}{4} \right] \right]
 \end{aligned}$$

3.4.2b

Despejando de la ecuación 3.4.2a, los términos con θC , y factorizando se tiene

$$\theta_j^{i+1} C_j^{i+1} - \theta_j^i C_j^i = \frac{\Delta t D}{2\Delta z^2} \left[C_{j+1}^{i+1} + C_{j+1}^i - C_j^{i+1} - C_j^i - C_{j-1}^{i+1} - C_{j-1}^i + C_{j-1}^{i+1} + C_{j-1}^i \right] \quad 3.4.3$$

definiendo $\alpha = \frac{\Delta t D_j^i}{2\Delta z^2}$, entonces

$$\theta_j^{i+1} C_j^{i+1} - \theta_j^i C_j^i = \alpha \left[C_{j-1}^{i+1} - 2C_j^{i+1} + C_{j+1}^{i+1} + C_{j-1}^i - 2C_j^i + C_{j+1}^i \right] \quad 3.4.4$$

Introduciendo α en el paréntesis y ordenando términos

$$\begin{aligned} \theta_j^{i+1} C_j^{i+1} - \theta_j^i C_j^i &= \alpha_{j-1} C_{j-1}^{i+1} - \alpha_j 2C_j^{i+1} + \alpha_{j+1} C_{j+1}^{i+1} + \\ &+ \left[\alpha_{j-1} C_{j-1}^i - \alpha_j 2C_j^i + \alpha_{j+1} C_{j+1}^i \right] \end{aligned} \quad 3.4.5$$

Ahora, considerando la parte II de la ecuación 3.4.1, y si

$$\beta_{j,j+1} = \frac{q_{j,j+1} \Delta t}{4\Delta z} \quad \text{y} \quad \beta_{j-1,j} = \frac{q_{j-1,j} \Delta t}{4\Delta z}, \quad \text{entonces}$$

factorizando y ordenando términos, se tiene

$$\begin{aligned} - \left[\beta_{j,j+1} C_{j+1}^{i+1} + \beta_{j,j+1} C_{j+1}^i + \beta_{j,j+1} C_j^{i+1} + \beta_{j,j+1} C_j^i - \beta_{j-1,j} C_j^{i+1} - \right. \\ \left. - \beta_{j-1,j} C_j^i - \beta_{j-1,j} C_{j-1}^{i+1} - \beta_{j-1,j} C_{j-1}^i \right] \end{aligned} \quad 3.4.6$$

agrupando términos

$$= - \left[-\beta_{j-1,j} C_{j-1}^{i+1} + \left[\beta_{j,j+1} - \beta_{j-1,j} \right] C_j^{i+1} + \beta_{j,j+1} C_{j+1}^{i+1} - \beta_{j-1,j} C_{j-1}^i + \right. \\ \left. + \left[\beta_{j,j+1} - \beta_{j-1,j} \right] C_j^i + \beta_{j,j+1} C_{j+1}^i \right] \quad 3.4.7$$

introduciendo el signo (-)

$$= \beta_{j-1,j} C_{j-1}^{i+1} + \left[\beta_{j-1,j} - \beta_{j,j+1} \right] C_j^{i+1} - \beta_{j,j+1} C_{j+1}^{i+1} + \beta_{j-1,j} C_{j-1}^i + \\ + \left[\beta_{j-1,j} - \beta_{j,j+1} \right] C_j^i - \beta_{j,j+1} C_{j+1}^i \quad 3.4.8$$

Hasta aquí la ecuación 3.4.1 quedaría de la siguiente manera

$$\theta_j^{i+1} C_j^{i+1} - \theta_j^i C_j^i = \alpha_{j-1} C_{j-1}^{i+1} - \alpha_j 2C_j^{i+1} + \alpha_{j+1} C_{j+1}^{i+1} + \\ + \left[\alpha_{j-1} C_{j-1}^i - \alpha_j 2C_j^i + \alpha_{j+1} C_{j+1}^i \right] + \beta_{j-1,j} C_{j-1}^{i+1} + \left[\beta_{j-1,j} - \beta_{j,j+1} \right] C_j^{i+1} \\ - \beta_{j,j+1} C_{j-1}^{i+1} + \beta_{j-1,j} C_{j-1}^i + \left[\beta_{j-1,j} - \beta_{j,j+1} \right] C_j^i - \beta_{j,j+1} C_{j+1}^i \quad 3.4.9$$

Ordenando términos en ambos lados de la igualdad, se tiene

$$\theta_j^{i+1} C_j^{i+1} - \alpha_{j-1} C_{j-1}^{i+1} + \alpha_j 2C_j^{i+1} - \alpha_{j+1} C_{j+1}^{i+1} + \beta_{j-1,j} C_{j-1}^{i+1} - \\ - \left[\beta_{j-1,j} - \beta_{j,j+1} \right] C_j^{i+1} + \beta_{j,j+1} C_{j+1}^{i+1} = \theta_j^i C_j^i + \alpha_{j-1} C_{j-1}^i - \alpha_j 2C_j^i + \\ + \alpha_{j+1} C_{j+1}^i + \beta_{j-1,j} C_{j-1}^i + \left[\beta_{j-1,j} - \beta_{j,j+1} \right] C_j^i - \beta_{j,j+1} C_{j+1}^i \quad 3.4.10$$

factorizando C^1 y C^{1+1} , se tiene

$$\begin{aligned} & \left[-\beta_{j-1,j} - \alpha_{j-1} \right] C_{j-1}^{1+1} + \left[\theta_j^{1+1} + 2\alpha_j + \beta_{j,j+1} - \beta_{j-1,j} \right] C_j^{1+1} + \\ & + \left[\beta_{j,j+1} - \alpha_{j+1} \right] C_{j+1}^{1+1} = \left[\beta_{j-1,j} + \alpha_{j-1} \right] C_{j-1}^1 + \\ & + \left[\theta_j^1 - 2\alpha_j - \beta_{j,j+1} + \beta_{j-1,j} \right] C_j^1 + \left[\alpha_{j+1} - \beta_{j,j+1} \right] C_{j+1}^1 \end{aligned}$$

3.4.11

Multiplicando por (-1) el miembro izquierdo se tiene

$$\begin{aligned} & \left[-\beta_{j-1,j} - \alpha_{j-1} \right] C_{j-1}^{1+1} + \left[\theta_j^{1+1} + 2\alpha_j + \beta_{j,j+1} - \beta_{j-1,j} \right] C_j^{1+1} + \\ & + \left[\beta_{j,j+1} - \alpha_{j+1} \right] C_{j+1}^{1+1} = - \left[-\beta_{j-1,j} - \alpha_{j-1} \right] C_{j-1}^1 - \\ & - \left[-\theta_j^1 + 2\alpha_j + \beta_{j,j+1} - \beta_{j-1,j} \right] C_j^1 - \left[-\alpha_{j+1} + \beta_{j,j+1} \right] C_{j+1}^1 \end{aligned}$$

3.4.12

Ahora bien, haciendo

$$A_j = -\beta_{j-1,j} - \alpha_{j-1} \quad 3.4.13$$

$$B_j = 2\alpha_j + \beta_{j,j+1} - \beta_{j-1,j} \quad 3.4.14$$

y sí

$$BA_j = \theta_j^1 + B_j \quad 3.4.15$$

$$BD_j = -\theta_j^1 + B_j \quad 3.4.16$$

$$C_j = -\alpha_{j+1} + \beta_{j,j+1} \quad 3.4.17$$

entonces la ecuación 3.4.11, quedaría como

$$A_J C_{J-1}^{i+1} + BA_J C_J^{i+1} + C_J C_{J+1}^{i+1} = -A_J C_{J-1}^i - BD_J C_J^i - C_J C_{J+1}^i \quad 3.4.18$$

y si

$$F_J = -A_J C_{J-1}^i - BD_J C_J^i - C_J C_{J+1}^i \quad 3.4.19$$

de esta manera la ecuación 3.4.17 queda de la siguiente forma

$$A_J C_{J-1}^{i+1} + BA_J C_J^{i+1} + C_J C_{J+1}^{i+1} = F_J \quad 3.4.20$$

Al plantear esta ecuación para cada uno de los puntos de la malla de cálculo, se puede obtener un sistema de N ecuaciones lineales con $N+2$ incógnitas; por tanto, será necesario establecer las condiciones de frontera para tener dos ecuaciones adicionales, y con ello igual número de ecuaciones e incógnitas.

La frontera superior estará representada por la ecuación

$$A_1 C_1^{i+1} + BA_2 C_2^{i+1} + C_3 C_3^{i+1} = -A_1 C_1^i - BD_2 C_2^i - C_3 C_3^i \quad 3.4.21$$

Como en las condiciones iniciales se conoce $A_1 C_1^{i+1}$, entonces

$$BA_2 C_2^{i+1} + C_3 C_3^{i+1} = -A_1 C_1^i - BD_2 C_2^i - C_3 C_3^i - A_1 C_1^{i+1} \quad 3.4.22$$

En la frontera inferior se tiene

$$A_{N-2} C_{N-2}^{i+1} + BA_{N-1} C_{N-1}^{i+1} + C_N C_N^{i+1} = -A_{N-2} C_{N-2}^i - BD_{N-1} C_{N-1}^i - C_N C_N^i \quad 3.4.23$$

Como en las condiciones iniciales es conocida $A_N C_N^{i+1}$, entonces

$$A_{N-2} C_{N-2}^{i+1} + BA_{N-1} C_{N-1}^{i+1} = -A_{N-2} C_{N-2}^i - BD_{N-1} C_{N-1}^i - C_N C_N^i - A_N C_N^{i+1} \quad 3.4.24$$

Planteando la ecuación 3.4.19 para todos los puntos de la malla de cálculo e incluyendo las condiciones de frontera 3.4.21 y 3.4.23, se puede formar un sistema de ecuaciones con igual número de incógnitas, como el siguiente

$$\begin{bmatrix}
 BA_1 & C_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 A_2 & BA_2 & C_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \dots & A_{N-1} & BA_{N-1} & C_{N-1} \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & A_N & BA_N
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 C_1 \\
 C_2 \\
 \vdots \\
 0 \\
 C_{N-1} \\
 C_N
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 F_1 \\
 F_2 \\
 \vdots \\
 0 \\
 F_{N-1} \\
 F_N
 \end{bmatrix}$$

A
 $\xrightarrow{\quad}$ C
 $\xrightarrow{\quad}$ F

O sea,

$$A \times \vec{C} = \vec{F} \quad 3.4.25$$

Dicha ecuación representa una matriz tridiagonal, donde \vec{C} representa los valores de las concentraciones en el instante $i+1$.

En el sistema 3.4.25 para las condiciones iniciales, $i=0$, se pueden calcular los valores de A y \vec{F} , con lo cual se tiene como incógnitas a \vec{C} . Resolviendo el sistema 3.4.25 se conocerán los valores de \vec{C} en el instante $i+1$, los que servirán para volver a calcular a A y \vec{F} y repetir el procedimiento para conocer las incógnitas en $i+2$, y así sucesivamente, hasta terminar el cálculo en el instante de tiempo de interés.

4 APLICACION DEL MODELO Y PLANTEAMIENTO DE LOS EJEMPLOS NUMERICOS DE SIMULACION

Para realizar las simulaciones del movimiento del agua y soluto en el perfil del suelo, así como del efecto de la concentración de soluto en la producción de un cultivo; se elaboró un programa para computadora personal, en lenguaje Quick-Basic 4.5 (ver *apéndice*). El programa se estructuró, tomando como base el presentado en la ref 2 (movimiento del agua), y adicionándole las ecuaciones desarrolladas en el capítulo anterior, correspondientes al movimiento de soluto y rendimiento de cultivos.

La forma en que opera el programa se presenta en el diagrama de bloques que aparece en el *apéndice*, y que en síntesis, es como sigue: con datos que consideran características particulares del suelo, soluto, cultivo y clima, y partiendo de ciertas condiciones iniciales de ψ_{matriz} y concentración de soluto, inicialmente se calcula el movimiento del agua

en el perfil del suelo, de donde se obtienen los valores de V y q , los cuales son utilizados para determinar la concentración y el movimiento del soluto en el suelo; dichos cálculos se realizan para incrementos de tiempo de cinco minutos.

Ahora bien, cada 24 horas y considerando los valores promedio de ψ_{matriz} y concentración de soluto en la profundidad radicular, se determina la ψ_{suelo} , la cual es la suma de la ψ_{matriz} y ψ_{soluto} ; calculando ésta última a partir de la concentración de soluto. Así también, cada 24 horas se verifica la humedad del suelo, la que si es menor a la humedad aprovechable (política de riego) fijada inicialmente, entonces se procede a regar. Por último, al final del ciclo vegetativo del cultivo, es determinado su rendimiento.

La versión del programa, presentado en el apéndice, incluye además subrutinas para graficación en pantalla y almacenamiento de resultados en disco.

Una vez puesto en operación el programa de cálculo, este fue alimentado con los datos necesarios para realizar la simulación de algunos ejemplos numéricos-prácticos, los cuales tienen como principal objetivo, el determinar la producción de un cultivo básico, bajo diferentes condiciones de humedad aprovechable, salinidad del suelo, calidad del agua de riego y la presencia de un manto freático salino. Al mismo tiempo, estos ejemplos permiten observar y comparar la evolución de la humedad y concentración de un soluto no reactivo con el suelo, durante el riego y ciclo vegetativo del cultivo, bajo dichas condiciones de simulación.

A continuación, se presentan las ecuaciones adicionales y datos que se emplearon en el modelo para realizar las simulaciones.

4.1 ECUACIONES PARA MODELAR EL MOVIMIENTO DEL AGUA

4.1.1 Permeabilidad

Para calcularla, se utilizaron las siguientes expresiones

$$KC(J) = KS \quad \text{si} \quad \psi < PS \quad 4.1.1$$

y

$$KC(J) = KS \left[\frac{\psi_J^{1+1/2}}{PS} \right]^{(-2BB-3)/BB} \quad \text{si } \psi > PS \quad 4.1.2$$

donde

KS: permeabilidad del suelo en el punto de saturación, m/s.

PS: tensión de saturación, mca.

BB: exponente que depende de cada tipo de suelo, (ref 2).

4.1.2 Relaciones W vs ψ

Para determinarlas, se emplearon las siguientes expresiones

$$W(J) = E2 - \ln(\psi(J)/E1) \quad \text{si } 0 < \psi < 3.3 \quad 4.1.3$$

y

$$W(J) = (A/\psi(J) - C)^{1/B} \quad \text{si } \psi > 3.3 \quad 4.1.4$$

donde

W(J): humedad real, en por ciento.

E1, E2, A, B y C: constantes que dependen de las características físicas del suelo, (ref 2).

ψ : en mca.

4.1.3 Parámetro C(ψ) = C(J)

Este parámetro representa la variación de W respecto a ψ , por lo que

$$\text{si } 0 < \psi < 3.3 \quad C(J) = CC(J) = - (1/E1) \psi(J) \quad 4.1.5$$

y para

$$\psi > 3.3 \quad C(J) = CC(J) = - (A^{1/B})/B(\psi(J) - C)^{(1+B)/B} \quad 4.1.6$$

En el listado del programa se observa que CC(J) tiene un signo diferente al indicado en las ecuaciones anteriores, ello se debe al ordenamiento que éstas tienen dentro del programa.

4.1.4 Extracción radicular, RAD(J)

Para determinarla, se utilizó un procedimiento que consta de dos etapas: Etapa A. Cálculo de la velocidad de extracción de humedad real en el estrato ΔZ del suelo

$$\text{RAD}(J) = GO (\text{ETp}/86400000) (\text{PR}) (\beta) \quad 4.1.7$$

donde

RAD(J): velocidad de extracción de humedad real, m³/s.

GO: densidad radicular del cultivo, adim.

ETp: velocidad potencial de evapotranspiración, m/s. Se puede calcular como la evapotranspiración potencial diaria.

PR: profundidad radicular, m.

β: coeficiente de transpiración, el cual depende de la PR.

Si no hay un cultivo establecido en el suelo, entonces RAD(J) = 0.

Etapa B. Cálculo del término de extracción S(ψ) = SC(J)

$$\text{SC}(J) = (\text{ETp}) \text{RAD}(J) \quad 4.1.8$$

donde ETp es adimensional, y para evaluarlo se proponen las siguientes expresiones

$$\text{Er}/\text{ETp} = \frac{1}{1 + \left[\frac{\psi_j}{4118 - 1613 \text{ ETp}} \right]^2} \quad \text{si } 0 < \text{ETp} < 2 \text{ mm} \quad 4.1.9a$$

$$\text{Er}/\text{ETp} = \frac{1}{1 + \left[\frac{\psi_j}{1386 - 250 \text{ ETp}} \right]^2} \quad \text{si } 2 < \text{ETp} < 4.1 \text{ mm} \quad 4.1.9b$$

$$\text{Er}/\text{ETp} = \frac{1}{1 + \left[\frac{\psi_j}{888 - 128 \text{ ETp}} \right]^2} \quad \text{si } 4.1 < \text{ETp} < 7 \text{ mm} \quad 4.1.9c$$

Recuérdese que en este trabajo se considera la evapotranspiración como única fuente de extracción de agua, y no como evaporación y transpiración por separado.

4.2 DATOS FÍSICOS DEL SUELO

Textura del suelo arcillosa, densidad aparente 1.2 g/cm³. Los valores de las constantes de las ecuaciones 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5 y 4.1.6, A = 0.01979, B = 5.57, C = -4.7561, E1 = 48.494, E2 = 0.36462. Exponente de

la ecuación de permeabilidad $BB = -2.6725$. Humedad a capacidad de campo 0.34, punto de marchitez permanente 0.20, saturación 0.4525, en por ciento. Tensión en saturación 0.0409 mca. Conductividad hidráulica 2.7×10^{-7} cm/s.

4.3 DATOS CLIMATOLÓGICOS

Se consultó el registro hidrológico de la estación Guapoca del Estado de Sonora. De la evaporación mensual total reportada, se determinó la evaporación promedio diaria (E_o); esto se hizo dividiendo la E_o total mensual entre el número de días del mes respectivo.

4.4 DATOS BIOLÓGICOS DEL CULTIVO

4.4.1 Coeficiente de desarrollo vegetativo, K_c

El valor de K_c puede variar para un mismo cultivo, no sólo en función de la variedad, que puede tener diferente desarrollo vegetativo, sino también del régimen de humedad al que se sujete el cultivo, y a otras características edáficas que influyen en su desarrollo. Existen varios métodos para su estimación.

Los valores de K_c para el cultivo de sorgo para grano, utilizados en este trabajo, son los reportados por la SARH (citados en la ref 7), de los cuales se tomaron los valores promedio para cada una de las etapas fenológicas del cultivo, ver fig 4.4.1.1.

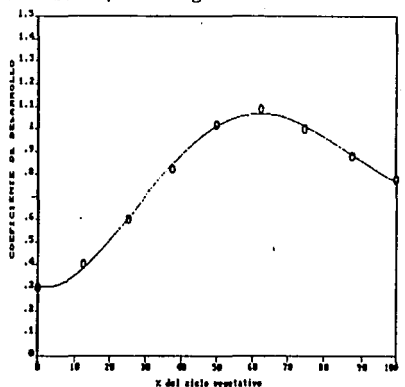


Figura 4.4.1.1 Curva K_c del cultivo de sorgo para grano, ref 7.

4.4.2 Desarrollo radicular de los cultivos, PR

La cantidad de agua que puede disponer el cultivo en un momento dado, depende de la profundidad explorada por sus raíces, la cantidad de agua disponible hasta dicha profundidad y de la efectividad con que las raíces puedan extraer la humedad del suelo en los distintos niveles.

En la bibliografía se reportan valores de la profundidad radicular del sorgo. El valor aquí utilizado fue tomado de la ref 7, donde dicha profundidad (80 cm) está relacionada con la textura del suelo.

4.4.3 Duración de las etapas fenológicas

Durante su ciclo biológico, los vegetales atraviesan por distintas etapas, acomodadas éstas a cierto ritmo periódico, como la brotación, la floración, la maduración, etc. Para que se manifiesten estas etapas, dentro de la planta deben ocurrir ciertos procesos que induzcan un estímulo, mismo que se traducirá en una nueva estructura o dará lugar a la manifestación de algún mecanismo fisiológico de adaptación. En gran parte, esos procesos dependen de las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrolla el cultivo, por lo tanto, la duración y equilibrio entre ellas son determinadas por el microclima.

En este caso, para determinar la duración de cada una de las etapas fenológicas del sorgo, el modelo se auxilia de la figura 4.4.3.1, donde dichas etapas están dadas en relación a la duración del ciclo vegetativo, en porciento. La duración de cada una de las cuatro etapas fenológicas del sorgo para grano, se muestran en el cuadro 4.4.3.1.

Cuadro 4.4.3.1. Duración de las etapas fenológicas del cultivo de sorgo para grano, determinadas a partir de la figura 4.4.3.1, ref 7.

Duración de las etapas fenológicas, días			
Nacimiento	Desarrollo vegetativo	Floración	Madurez
28	42	28	22

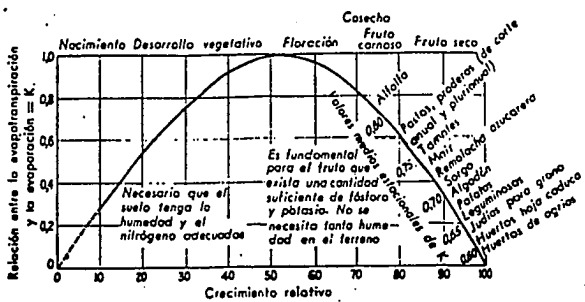


Figura 4.4.3.1. Curva que relaciona el cociente Er/ETp con el crecimiento del cultivo, a partir de la cual se determina la duración de c/u de las etapas fenológicas del cultivo, ref 7.

4.4.4 Características agronómicas del cultivo de sorgo para grano

En el cuadro 4.4.4.1 se muestran algunos datos sobre las recomendaciones para el cultivo del sorgo para grano, en el Estado de Sonora. La fecha de siembra del cultivo, para las simulaciones, se supone el 1o de abril; fecha a partir de la cual se consideraron los registros de evaporación.

Cuadro 4.4.4.1. Datos sobre las recomendaciones para el cultivo del sorgo para grano, (Tomados de la ref 7).

Variedad	días a cosecha	época de siembra	densidad de siembra	distancia surcos, m	producción ton/ha
Sorda	110-120	25 de marzo 30 de abril	100,000 ptas/ha. 15 kg de semilla	0.62	12

4.5 CONDICIONES INICIALES DE HUMEDAD Y CONCENTRACIÓN DE SOLUTO EN EL SUELO

4.5.1 Humedad inicial

Para el caso de las condiciones de humedad inicial, se supuso una humedad uniforme en todo el perfil del suelo, igual a la de capacidad de campo, esto es 0.34.

4.5.2 Concentración inicial de sal en el suelo

Cuando se investiga la salinidad del suelo con relación al desarrollo de las plantas, se recomienda usar la conductividad del extracto de saturación como un medio para evaluar salinidad.

La ventaja especial del método del extracto de saturación para medir la salinidad, estriba en el hecho de que el porcentaje de saturación está relacionado directamente con los distintos valores de la humedad de campo. En el terreno, el contenido de humedad fluctúa desde el límite más bajo, representado por el "porcentaje de marchitez permanente", hasta el límite superior del agua aprovechable, "capacidad de campo", que es casi dos veces el valor del primero. Las determinaciones hechas en muchos suelos indican que dentro de un amplio margen de texturas, el porcentaje de saturación (PS) es aproximadamente igual a cuatro veces el porcentaje de humedad a 15 atmósferas, el cual a su vez se aproxima mucho al porcentaje de marchitez. La concentración de sales solubles del extracto de saturación tiende, por lo tanto, a ser casi la mitad de la concentración de la solución del suelo en el límite superior de humedad, y casi la cuarta parte de la concentración que tendría la solución del suelo en el límite inferior de humedad. El efecto de la dilución de las sales que ocurre en suelos de texturas finas a causa de su mayor capacidad de retención de humedad, está tomado en consideración automáticamente. Por esta razón, la conductividad del extracto de saturación (CE_{es}) se puede usar directamente para estimar el efecto de la salinidad del suelo en el desarrollo de la planta.

De lo anterior, y utilizando la clasificación americana de suelos salinos, se propuso la concentración de sal inicial. Para esto se usó la *figura 4.5.2.1 (ref 4)*, de donde se eligieron los valores de CE de 1 y 6, correspondientes a una concentración de sales del extracto de saturación de 10 y 70 meq/l respectivamente, para un suelo no salino y salino. Pero como las condiciones iniciales de humedad se supusieron a capacidad de campo (CC), entonces la concentración real de sal en el campo sería de 20 y 140 meq/l.

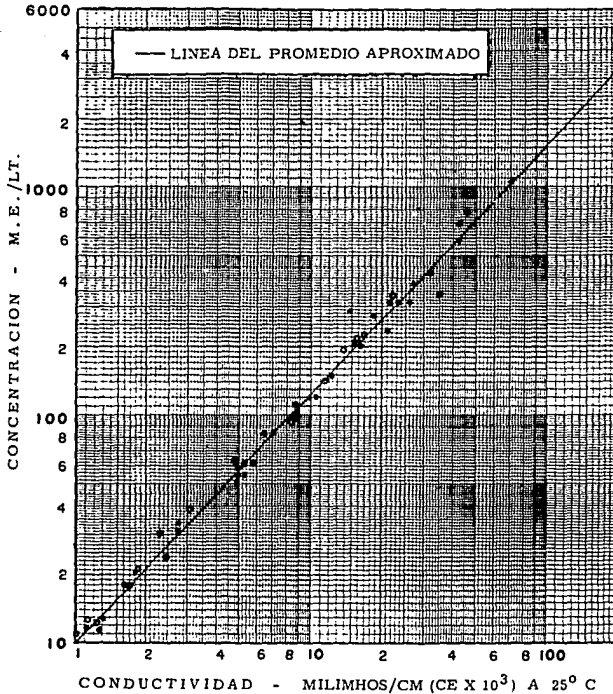


Figura 4.S.2.1. Concentración de los extractos de saturación de los suelos, en miliequivalentes por litro y su relación a conductividad eléctrica, ref 4.

4.6 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL SOLUTO

Considerando que el NaCl es la sal predominante en los suelos salinos, y de que además la versión del modelo aquí presentada, simula el movimiento de un soluto no reactivo con las partículas del suelo; en este trabajo se propone simular el movimiento del ión cloruro (Cl⁻). De acuerdo con esto, los valores de las constantes de las ecuaciones de difusión 3.2.1.3 y 3.2.1.5, se tomaron de la referencia 2, siendo estos los siguientes: $D_0 = 0.04$, $a = 0.002$, $b = 10$ y $\lambda = 0.12$.

4.7 RELACIÓN ENTRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y EL CONTENIDO DE SALES DE UNA SOLUCIÓN

Como se dijo anteriormente en los capítulos 2 y 3, el esfuerzo que realiza la planta para tomar agua del suelo, va a depender de la tensión total de la humedad en el suelo, la cual está compuesta principalmente por el potencial mátrico ψ , en el caso de que el suelo contenga una cantidad apreciable de sal, del potencial osmótico. En otras palabras

$$\Psi = \psi_m + \psi_o \quad 4.7.1$$

En la ref. 7 se menciona que es posible establecer una relación directa entre la concentración salina de una solución y su conductividad eléctrica. Es así que, para valores de conductividad eléctrica menores a 10 mmhos/cm, la concentración de sales C en miliequivalentes por litro es aproximadamente igual a

$$C(\text{meq/l}) = CE(\text{mmhos/cm}) \times 10 \quad 4.7.2$$

Ahora bien, como en el presente trabajo se esperan valores grandes de la concentración de sales, y por lo tanto valores altos de CE; entonces la ecuación 4.7.2 no sería aplicable bajo estas condiciones. Esto se resolvió, haciendo una regresión lineal de la recta mostrada en la figura 4.5.2.1, para valores de CE entre 10 y 30 mmhos/cm; obteniendo así la siguiente ecuación

$$CE = (\text{meq/l} + 26.7)/14.5 \quad 4.7.3$$

Ambas ecuaciones 4.7.2 y 4.7.3, se usan para determinar la CE de la solución del suelo en un momento dado, para concentraciones de sal entre 10 y 400 meq/l.

Por otra parte, existe una relación entre la CE y la presión osmótica de una solución. Para el rango de conductividad eléctrica de 3 a 30 mmhos/cm, dicha relación es igual a

$$\text{Presión osmótica(atm)} = CE(\text{mmhos/cm}) \times 0.36 \quad 4.7.4$$

De esta manera, utilizando las ecuaciones 4.7.1 a 4.7.4, es posible determinar el potencial total de la humedad del suelo.

Ahora bien, dado que el cálculo para modelar cultivos es por día, entonces la forma en que se unió a los otros dos modelos, fue el considerar a cada 24 hrs de simulación, los valores promedio tanto de tensión como de concentración de sales, correspondientes a los intervalos de la profundidad radicular (PR); siendo dichos valores con los cuales se simuló la producción del cultivo de sorgo para grano.

4.8 CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO

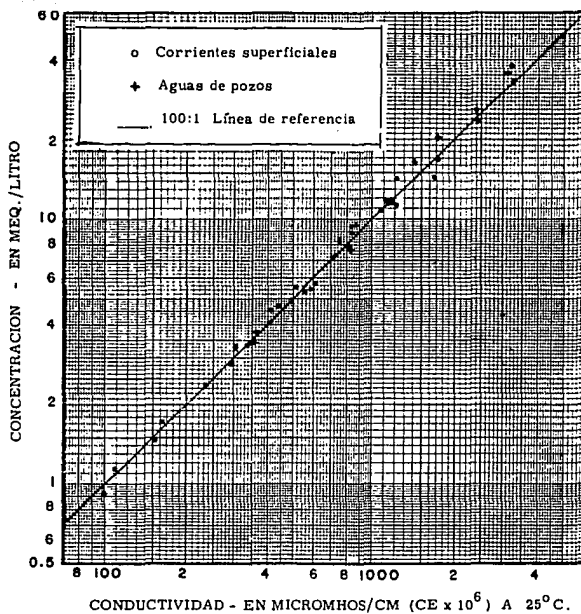
La calidad del agua de riego que se propuso, esta basada en la clasificación de aguas para riego descrita en el Capítulo 2. Para determinar la concentración de sales de dicha agua, se uso la figura 4.8.1, de la cual, a partir de valores propuestos de CE (1 y 7) se determinó la concentración de sal correspondiente a un agua de buena y mediana calidad, siendo dicha concentración 1.5 y 7 meq/l, respectivamente.

En cuanto a las políticas de H.A, la tensión de humedad del suelo a la cual se debería de regar en cada una de ellas, se obtuvo, en primer lugar, relacionando el intervalo CC-PMP (0.34 a 0.20 respectivamente) con el de H.A (0 a 100 porciento); y finalmente, usando la ecuación 4.1.4, de donde se despeja ψ , se obtuvieron dichas tensiones.

Por otra parte, a continuación se hace una descripción, a grandes rasgos, del propósito de los diferentes ejemplos que se simularán en este trabajo.

1. Evolución de humedades promedio en el perfil del suelo, durante el C.V., en las políticas del 50 y 30 porciento de H.A., y bajo condiciones de salinidad del suelo y agua de riego.

Estos permitirán observar la evolución de la humedad promedio en el perfil del suelo; los días en que se da el riego, y la recuperación de la humedad en cada uno de los riegos dados, para cada política de H.A.



CONDUCTIVIDAD - EN MICROMHOS/CM (CE x 10⁶) A 25°C.
 Figura 4.8.1. Relación entre la concentración de sales y conductividad eléctrica de las aguas para riego, ref 4.

2. Perfiles de humedad y concentración del ión cloruro (Cl⁻), durante el C.V.

Determinar la variación de la distribución de humedad y concentración de Cl⁻, durante y al final del C.V; así como, la tendencia al aumento o disminución de la concentración del Cl⁻.

3. Perfiles de humedad y concentración de Cl⁻ durante el riego.

Determinar la evolución de la infiltración de agua y distribución de concentraciones del Cl⁻, durante la aplicación del riego.

4. Rendimiento del cultivo.

Comparar el rendimiento del cultivo, bajo las diferentes condiciones de H.A., salinidad del suelo y agua de riego.

5. Efecto del nivel freático.

Determinar el perfil de humedades en equilibrio, entre el nivel freático y el cultivo, así como la variación de la humedad promedio en el perfil del suelo, durante el C.V.

Por último, se ha considerado conveniente incluir en este capítulo, las observaciones más importantes sobre el modelo matemático propuesto.

Las principales limitaciones de la simulación de algunos procesos, utilizando modelos matemáticos, se derivan de los supuestos y simplificaciones hechas para la estimación de dichos procesos; pero que brindan a cambio, sencillez y versatilidad al modelo. A continuación se hace un análisis crítico del modelo.

1. La demanda evaporativa de la atmósfera es representada por los valores obtenidos de un evaporímetro; esto permite una gran simplicidad al modelo y una mayor posibilidad de aplicación, ya que aunque existen métodos más precisos para evaluar el poder evaporante de la atmósfera, estos requieren un mayor número de datos climáticos, no siempre disponibles en las estaciones climatológicas del país.

2. El hecho de que el modelo no considera ciertas restricciones de tipo planta-ambiente (fotoperíodo, temperaturas mínimas, incidencia de insectos, malezas, enfermedades, entre otros) durante las etapas fenológicas, permite suponer que dicho modelo sólo puede ser empleado en cultivos adaptados a las condiciones ambientales del área en la cual se desee emplear éste, y siempre que se de un control oportuno de las plagas.

3. Los únicos factores aleatorios que se suponen gobiernan la producción de un cultivo son: la evapotranspiración y la lluvia. Esto deja como fijos los demás factores que afectan la producción, los cuales están implícitos en el parámetro de producción máxima del cultivo.

4. La estimación del rendimiento de cultivos (de grano y/o forraje) relacionado con la humedad aprovechable del suelo, constituye un aspecto muy importante del modelo; ya que en este caso, no sólo permite

determinar la mejor política de humedad bajo la cual se obtienen los mejores rendimientos, sino también algo muy importante, el momento de aplicación del riego.

5. La concentración del soluto no afecta la conductividad hidráulica del suelo, por lo que el modelo no considera los casos en los que se tenga un suelo de textura fina, y altas concentraciones de sodio.

6. El suelo es homogéneo vertical y horizontalmente, aunque el modelo es capaz de simular suelos con un perfil heterogéneo, para lo cual sólo es necesario tener los datos físicos, de cada una de las capas del suelo, que requiere el modelo para el cálculo.

7. Se suponen condiciones isotermales en todo el perfil del suelo; esto permite simular el movimiento de aquellas sales en las que su grado de solubilidad varía con respecto a los cambios de temperatura.

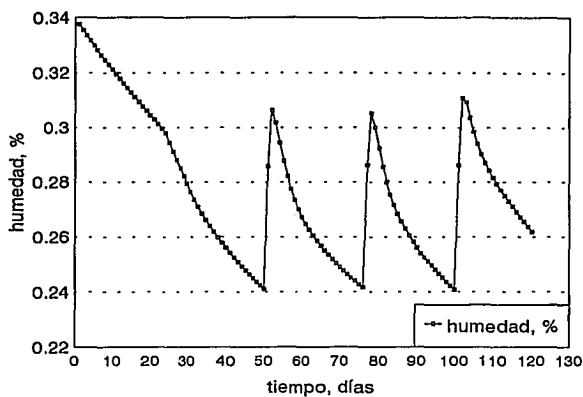
5 ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación, se hace el análisis de los resultados de las simulaciones de los ejemplos mencionados en el capítulo anterior; los cuales están orientados, como propósito principal, hacia la determinación de la producción del sorgo para grano, bajo las siguientes condiciones: 1) tres políticas de riego (30, 50 y 70 por ciento de H.A.), 2) dos niveles de salinidad del suelo (20 y 140 meq/l), 3) dos calidades de agua (1.5 y 7 meq/l), y 4) la presencia de un manto freático salino. Además, observar y comparar la evolución de la humedad y concentración del ión Cl^- , durante el riego y ciclo vegetativo del sorgo, bajo las condiciones, arriba mencionadas, de salinidad.

5.1 EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD PROMEDIO EN EL PERFIL DEL SUELO, DURANTE EL C.V., EN LAS POLÍTICAS DE H.A., DEL 50 Y 30 PORCIENTO, Y BAJO CONDICIONES DE SALINIDAD DEL SUELO Y AGUA DE RIEGO.

Las figuras 5.1.1 y 5.1.2 muestran la variación promedio diaria de la

30% H.A., suelo salino regado con agua de mediana calidad



30% H.A., suelo no salino regado con agua de buena calidad

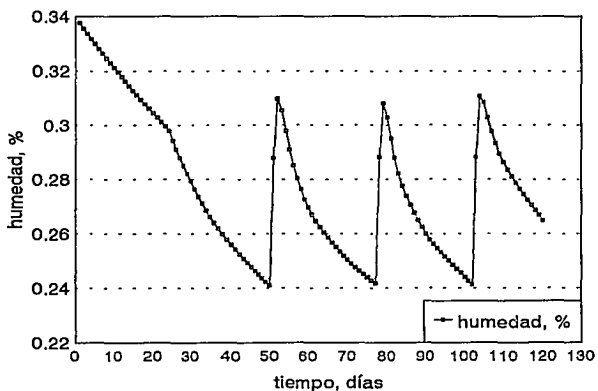
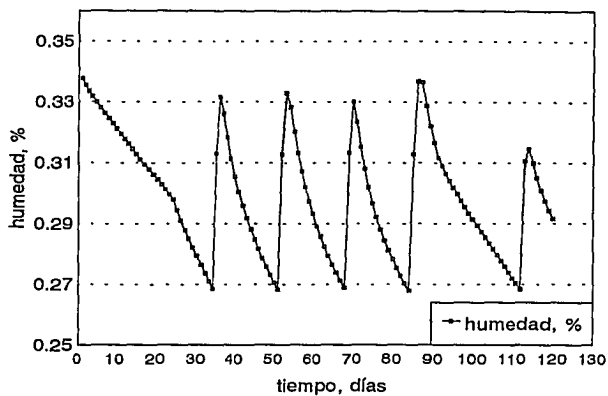


Fig. 5.1.1 Humedad promedio diaria en el perfil del suelo, durante el ciclo vegetativo del sorgo.

50% H.A., suelo salino regado con agua de mediana calidad



50% H.A., suelo no salino regado con agua de buena calidad

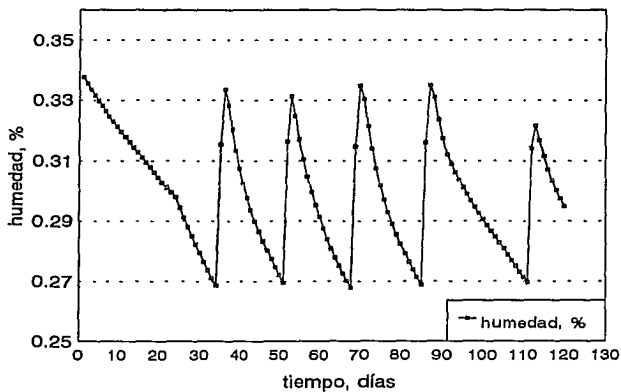


Fig. 5.1.2 Humedad promedio diaria en el perfil del suelo, durante el ciclo vegetativo del sorgo.

"humedad real" en el perfil del suelo (en por ciento), durante el ciclo vegetativo del sorgo para grano, bajo las políticas de humedad aprovechable (H.A.) 30 y 50 por ciento, y condiciones de suelo salino y no salino.

Es importante observar, que la humedad de capacidad de campo, promedio en el perfil, a la cual se debería de llegar de acuerdo a las políticas de H.A., no es alcanzada en ninguno de los riegos dados durante el ciclo vegetativo del cultivo. La causa de esto puede ser que la ecuación que relaciona la humedad con la tensión del suelo, para valores menores a 0.33 atms, no coincide con su similar correspondiente para el intervalo de tensiones entre 0.33 y 15 atms; esto debido, a su vez, a que ambas ecuaciones han sido supuestas para efecto de este trabajo, y por lo tanto, se recomienda que cuando se calibre el modelo con datos de campo, se tenga una especial atención a este aspecto.

5.2 PERFILES DE HUMEDAD Y CONCENTRACIÓN DEL IÓN Cl^- DURANTE EL C.V.

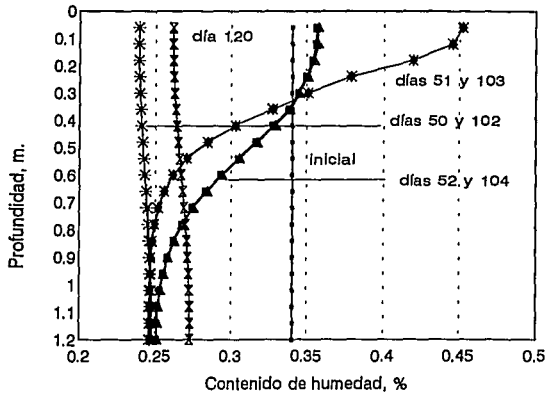
5.2.1 Perfiles de humedad

Las figuras 5.2.1.1 y 5.2.1.2 muestran la variación del contenido de humedad en el perfil del suelo para los casos de las condiciones iniciales, antes y después de regar por primera y última vez, así como la distribución final al término del ciclo vegetativo del sorgo, bajo las políticas de H.A. del 30 y 50 por ciento.

Considerando el perfil de humedades correspondiente al día anterior al riego, se observa que la pérdida de humedad no es homogénea, siendo mayor en los primeros 80 cm de suelo, que es donde se encuentra el sistema radicular del cultivo; el cual es, en este caso, el principal factor que influye en la pérdida de agua del suelo.

En cuanto a la distribución de la humedad, después del riego, se observa que ésta no es homogénea en el perfil, teniéndose humedades mayores a la de capacidad de campo en los primeros 30 cm, y humedades menores a dicho valor en profundidades que oscilan entre los 40 y 80 cm; dichos resultados, descartan la suposición de que la capacidad de campo se alcanza de manera uniforme en el suelo después del riego. Además, estos sugieren que para el trabajo de campo, sería recomendable que con los

30% H.A., suelo no salino regado con agua de buena calidad



30% H.A., suelo salino regado con agua de mediana calidad

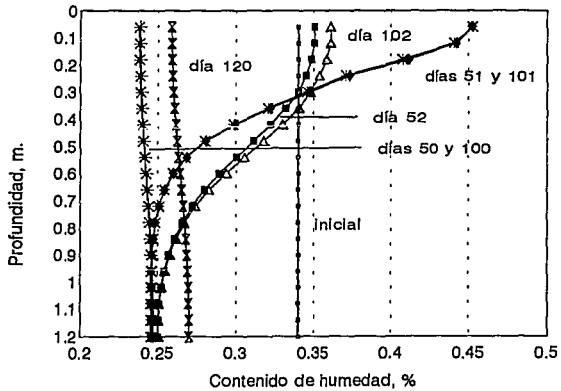
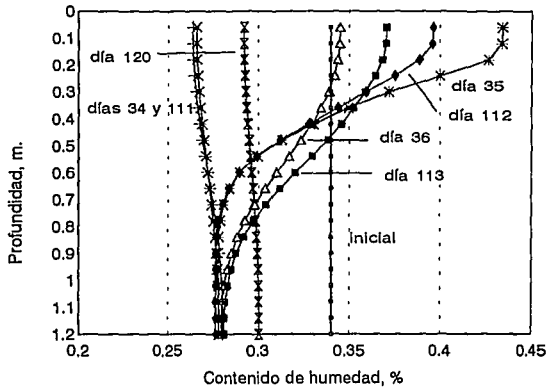


Fig. 5.2.1.1 Distribución de la humedad en el perfil del suelo.

50% H.A., suelo no salino regado con agua de buena calidad



50% H.A., suelo salino regado con agua de mediana calidad

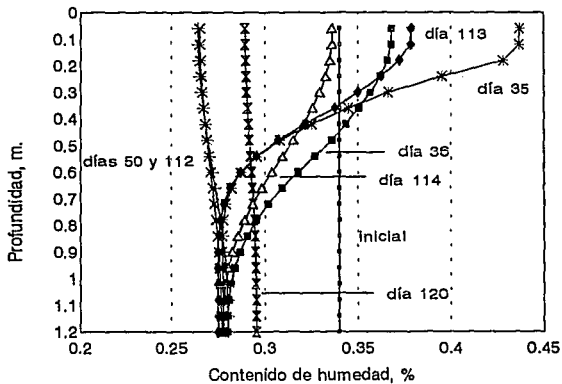


Fig. 5.2.1.2 Distribución de la humedad en el perfil del suelo.

datos de humedad iniciales, se hiciera la simulación de un riego, y con el perfil de humedad resultante se iniciara la simulación general.

Por otra parte, cabe señalar que durante el riego no se considera la influencia de la extracción radicular, dado que la infiltración ocurre durante horas y la evapotranspiración ocurre en días.

5.2.2 Perfiles de concentración del ión cloruro, Cl^-

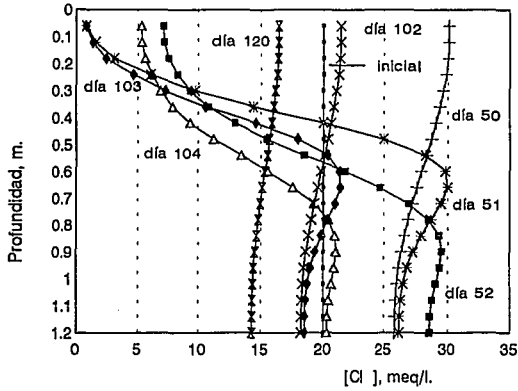
Las figuras 5.2.2.1 y 5.2.2.2 muestran la distribución de la concentración del ión cloruro (Cl^-) en el perfil del suelo para los casos de las condiciones iniciales, antes y después de regar por primera y última vez, así como la distribución final de las concentraciones al término del ciclo vegetativo del sorgo, bajo las políticas de H.A. del 30 y 50 por ciento.

Comparando la distribución del Cl^- antes y después del riego, se observa una disminución de la concentración del Cl^- hasta cierta profundidad, a partir de la cual se tiene un aumento en dicha concentración. En cuanto al descenso de la concentración del Cl^- , éste se debe al aumento de la humedad del suelo, así como al lavado del ión Cl^- , que en general se produce más allá de los 40 cm de profundidad, en donde se encuentra aproximadamente el 80 por ciento del sistema radicular del cultivo; quedando de ésta manera, fuera de la influencia que ésta ejerce sobre el transporte de la solución del suelo. Esto explica por que, después de varios riegos, al final del ciclo vegetativo del cultivo, el perfil de concentraciones del Cl^- es menor que el inicial.

En cuanto al aumento de la concentración del Cl^- en los estratos inferiores del suelo, esto se debe, como se dijo anteriormente, a la cantidad de Cl^- que es lavado del estrato superior, donde parte de éste se acumula en dichos estratos.

Por otra parte, comparando los últimos perfiles de concentración del Cl^- (día 120), de ambas políticas de H.A, se observa que las concentraciones del Cl^- son menores en la política del 50 por ciento, dichos resultados concuerdan con lo citado en la bibliografía, con respecto a que se logra una mayor eficiencia en el lavado de sales, aplicando riegos ligeros y

30% H.A., suelo no salino regado con agua de buena calidad



30% H.A., suelo salino regado con agua de mediana calidad

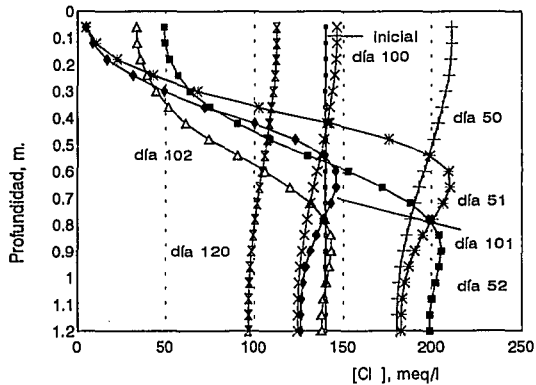
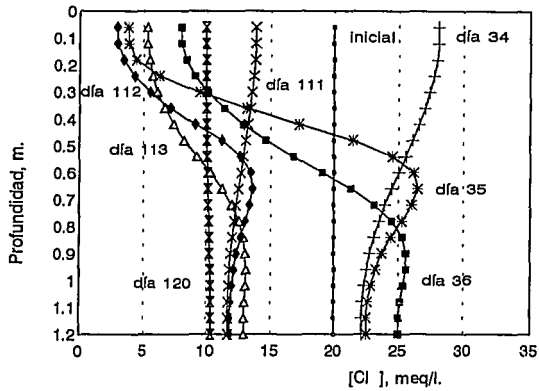


Fig. 5.2.2.1 Distribución de la concentración del cloruro (Cl), en el perfil del suelo.

50% H.A., suelo no salino regado con agua de buena calidad



50% H.A., suelo salino regado con agua de mediana calidad

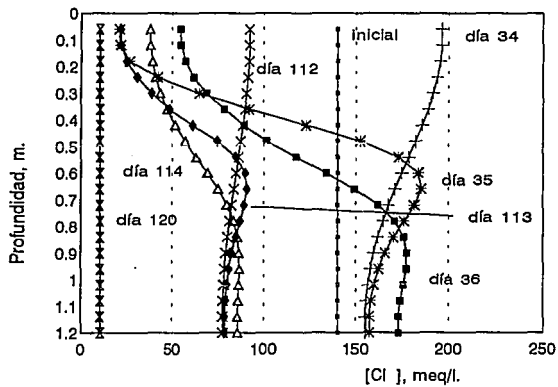


Fig. 5.2.2.2 Distribución de la concentración del cloruro (Cl), en el perfil del suelo.

frecuentes, que cuando se aplican riegos pesados y más espaciados.

5.3 PERFILES DE HUMEDAD Y CONCENTRACIÓN DEL IÓN Cl^- DURANTE EL RIEGO

5.3.1 Perfiles de humedad

Las figuras 5.3.1.1 y 5.3.1.2 muestran la distribución de la humedad en el perfil del suelo, durante el tiempo en que se lleva a cabo el primer riego, en las políticas del 30 y 50 por ciento de H.A.

En los cuatro casos mostrados se observa que la mayor infiltración de agua ocurre durante las dos primeras horas del riego, lo cual se debe a que al saturarse los primeros centímetros de suelo superficial, provoca que la infiltración disminuya ocasionando con esto que el agua tarde más tiempo en penetrar a profundidades mayores.

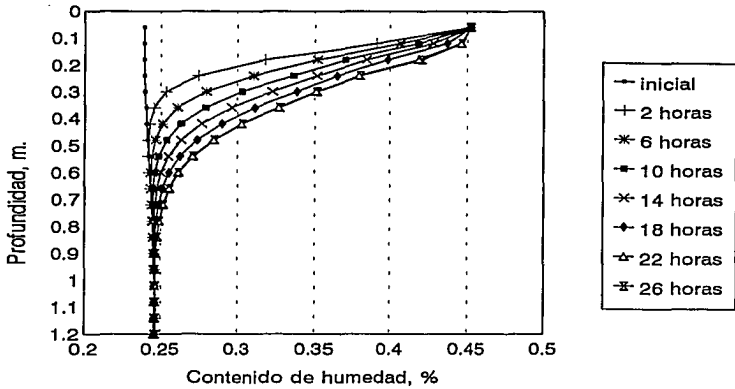
Ahora bien, comparando el perfil de humedades entre las dos políticas de H.A., 30 y 50 por ciento, bajo las mismas condiciones de suelo y agua de riego, se observa que estos son muy parecidos, aunque el tiempo de cada riego en la política del 30 por ciento es 10 horas mayor que en la del 50 por ciento; esto se debe a que, por una parte, se requiere una mayor cantidad de agua para recuperar la humedad de capacidad de campo en el perfil del suelo; pero también, como se dijo anteriormente, a la disminución de la infiltración provocada por la saturación de las capas superiores del suelo. En este caso es oportuno comentar, que el modelo no prevee que el suelo se encuentre agrietado en condiciones de bajo contenido de humedad; esto podría provocar que, bajo condiciones reales, el tiempo de riego fuera menor al calculado por el modelo en ambas políticas de H.A, modificando con esto, probablemente también, el perfil de humedades.

5.3.2 Perfiles de concentración del ión Cl^-

Las figuras 5.3.2.1 y 5.3.2.2 muestran la distribución del ión cloruro (Cl^-) en el perfil del suelo, en el tiempo en que se lleva a cabo el primer riego, en las políticas del 30 y 50 por ciento de H.A.

Comparando los perfiles de concentración del Cl^- con sus correspondientes distribuciones de humedad, mostrados en las figuras 5.3.1.1 y 5.3.1.2, se observa que existe una gran relación entre la

30% H.A., suelo no salino regado con agua de mediana calidad



30% H.A., suelo salino regado con agua de mediana calidad

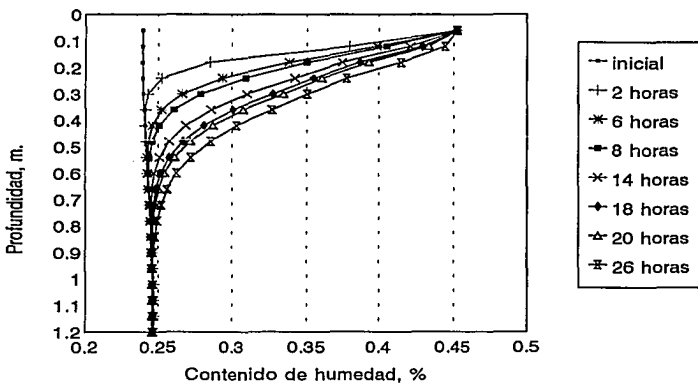
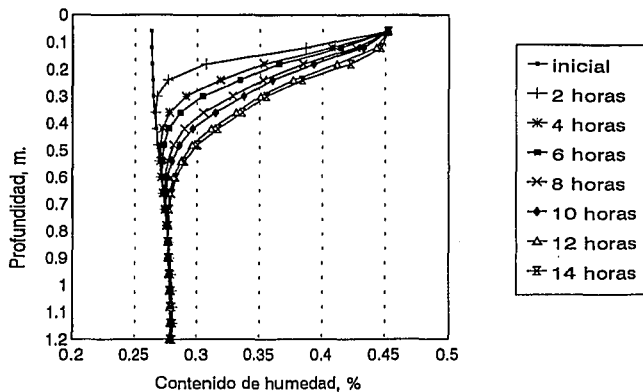


Fig. 5.3.1.1 Distribución de la humedad en el perfil del suelo, durante el primer riego.

50% H.A., suelo no salino regado con agua de buena calidad



50% H.A., suelo salino regado con agua de mediana calidad

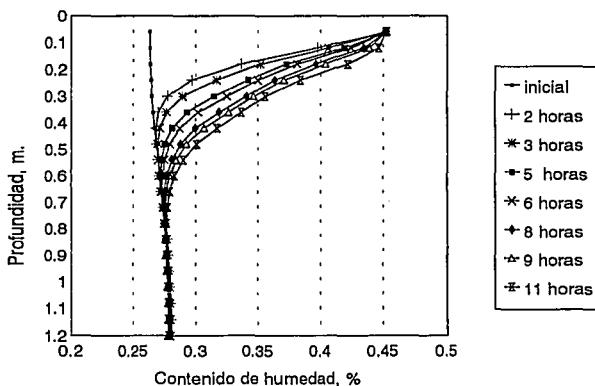
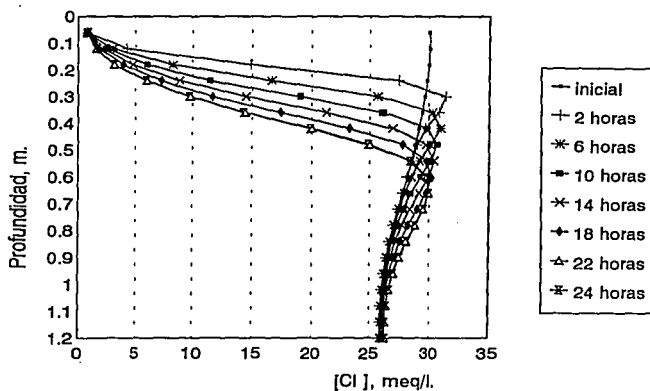


Fig. 5.3.1.2 Distribución de la humedad en el perfil del suelo, durante el primer riego.

30% H.A., suelo no salino regado con agua de buena calidad



30% de H.A, suelo salino regado con agua de media calidad

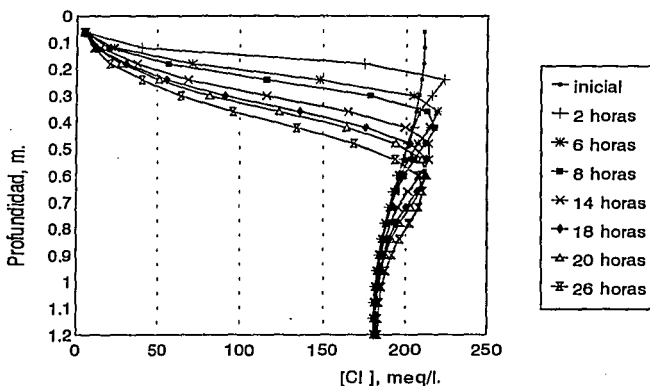
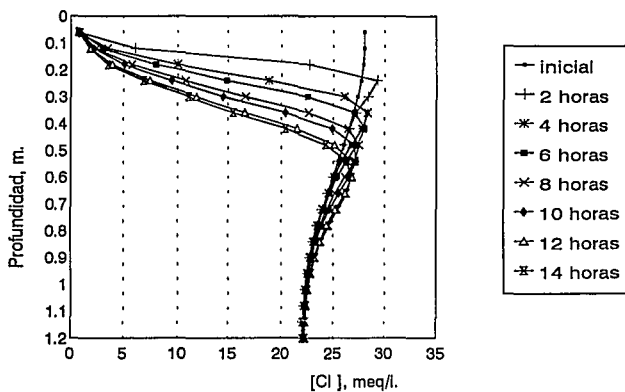


Fig. 5.3.2.1 Distribución de la concentración del ión Cl en el perfil del suelo, durante el primer riego.

50% H.A., suelo no salino regado con agua de buena calidad



50% H.A., suelo salino regado con agua de mediana calidad

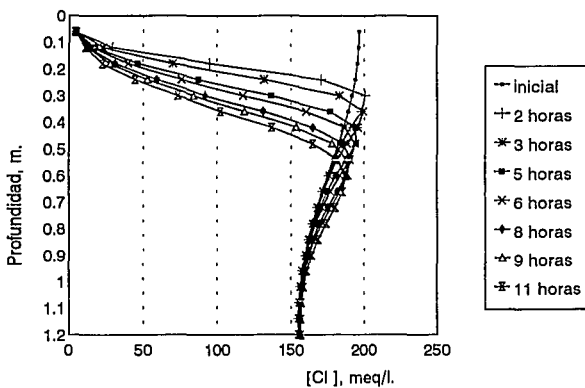


Fig. 5.3.2.2 Distribución de la concentración del ión Cl en el perfil del suelo, durante el primer riego.

humedad contenida en el suelo y la concentración del Cl^- . Esto se debe a que, por una parte, el contenido de agua en el suelo afecta la concentración del Cl^- ; y por otro lado, a que al infiltrarse dicha agua durante el riego, ésta transporta al Cl^- a profundidades mayores. Esto último, explica por qué a partir de un cierto punto en el perfil del suelo, la concentración de Cl^- aumenta con respecto a la que se tiene antes de iniciar el riego.

Por otra parte, se observa que hay un lavado del Cl^- en los primeros 40 cm del suelo al finalizar el riego, aunque si se ven las figuras 5.2.2.1 y 5.2.2.2, dicho lavado alcanza poco más de los 60 cm, dos días después de iniciado el riego, esto último es debido a que la infiltración de agua continúa, aún cuando el sistema radicular del cultivo se encuentra activo.

5.4 RENDIMIENTO DEL CULTIVO

En el cuadro 5.4 aparecen los resultados del rendimiento en grano del sorgo, obtenidos en cada una de las políticas de H.A, condiciones de suelo (salino y no salino), y agua de riego (buena y mala calidad).

Considerando la producción obtenida en las diferentes políticas de H.A, el mayor rendimiento se obtiene en la política del 70 por ciento, siendo estos de 10.0 y 10.5 ton/ha, para suelo salino y no salino, respectivamente; dicho rendimiento, corresponde al 82.5 y 87 por ciento correspondientemente, del óptimo esperado.

Ahora bien, en cuanto al rendimiento obtenido con la misma política de H.A. (30 y 50 por ciento), pero bajo diferentes condiciones de suelo, se observa que no hay una diferencia significativa (sólo del 5.5 y 10.4 por ciento para el 30 y 50 por ciento, respectivamente). La explicación de estos resultados radica en que, por una parte, la tensión del soluto es menor que la del suelo, y por lo tanto, ésta última influye más en la disposición del agua para los cultivos, y consecuentemente, en su producción; y la otra, a que la concentración del ión cloruro disminuye debido a la lixiviación de éste durante el riego, lo cual produce una disminución en la tensión por soluto, por lo que no en todas las etapas fenológicas es constante la tensión.

Cuadro 5.4. Rendimiento del grano de sorgo bajo diferentes condiciones de humedad, suelo y agua de riego.

Política de riego H.A, %	Producción de grano de sorgo, ton/ha	
	suelo salino y riego con agua de buena calidad	suelo no salino y riego con agua de mediana calidad
30	3.85	4.5
50	7.13	8.3
70	10.00	10.5

5.5 EFECTO DEL NIVEL FREÁTICO

5.5.1 Evolución de la humedad promedio en el perfil del suelo durante el C.V.

La figura 5.5.1 muestra la variación de la humedad promedio en el perfil del suelo, bajo condiciones de suelo salino y en presencia de un nivel freático salino, localizado a 1.2 m de profundidad.

En dicha figura se puede observar que aún sin dar un sólo riego, la humedad del suelo nunca baja más allá de 0.338, durante todo el ciclo vegetativo (C.V) del cultivo. Esto se debe a que la evapotranspiración fue muy elevada durante todo el tiempo. Por otra parte, la curva de humedades refleja indirectamente la variación de la evapotranspiración durante el C.V; correspondiendo los mayores valores al valle de la curva, en donde la velocidad de evapotranspiración es mayor a la velocidad de ascenso del agua a través del perfil, secándose por tanto el suelo. Lo contrario sucede en los picos de la curva, donde la velocidad de evapotranspiración es menor a la velocidad de ascenso del agua, y por lo tanto hay un aumento en la humedad del suelo.

5.5.2 Perfiles de concentración del ión Cl^- durante el C.V.

La figura 5.5.2 muestra la distribución de la concentración del ión Cl^- , en el perfil del suelo, al inicio del ciclo y en los días 60 y 120; bajo condiciones de suelo y nivel freático salinos, localizado éste último a 1.2 m de profundidad.

Fig 5.5.1 Evolución de la humedad promedio en el perfil del suelo, durante el C.V. del sorgo, y bajo condiciones de suelo y nivel freático salinos

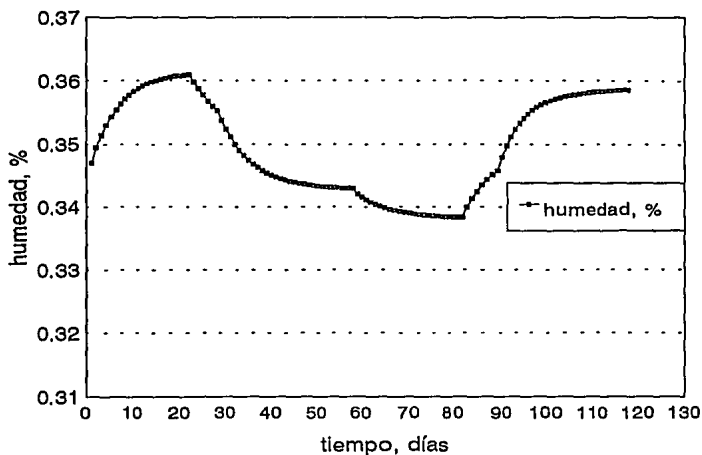
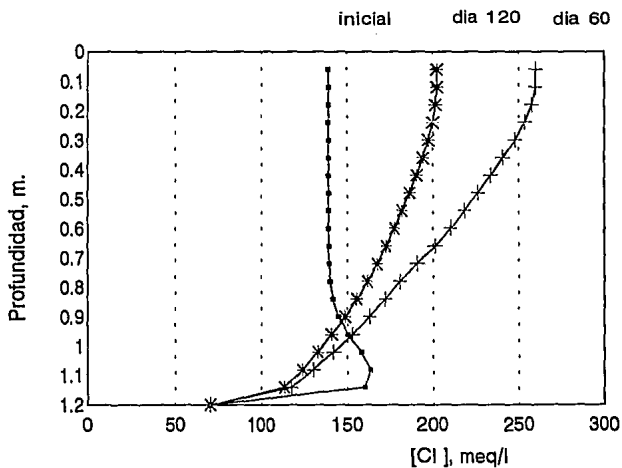


Fig 5.5.2 Perfiles de concentración del ión cloruro, en algunos días del ciclo vegetativo del sorgo.



En dicha figura se observa cómo cambia el perfil de concentraciones del Cl^- , al establecerse el equilibrio entre el cultivo y el nivel freático; y cómo se tiene una mayor concentración en el día 60 con respecto al día 120; esto aún cuando no se dio ningún riego durante todo el ciclo. Lo anterior se debe a que, alrededor del día 60 se tiene la mayor evapotranspiración durante el C.V, lo cual provoca que disminuya la humedad del suelo, y por lo tanto halla un aumento en la concentración del ión Cl^- ; y en cuanto a las concentraciones del día 120, estas se deben a que al final del ciclo, la velocidad de evapotranspiración es menor a la velocidad de ascenso del agua en el suelo, provocando con esto que aumente la humedad del suelo; y en consecuencia, que disminuya la concentración del ión Cl^- .

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha propuesto un modelo numérico que simula el rendimiento de cultivos (sorgo), bajo el efecto de la concentración de un soluto no reactivo (ión Cl^-), contenido en la solución del suelo. Dicho modelo resuelve las ecuaciones fundamentales correspondientes a la simulación del movimiento del agua en suelos no saturados, así como la del transporte de un soluto no reactivo con el suelo.

El modelo permite, principalmente, simular la evolución de la humedad y el soluto en el perfil del suelo, analizar políticas de riego, calcular la producción final de cultivos, analizar el lavado de suelos, y determinar los efectos de salinización del suelo, por parte del agua de riego y manto freático con problemas de sal.

Se considera que los resultados obtenidos en las simulaciones son consistentes, y por lo tanto el modelo es confiable; sin embargo, es

necesario realizar pruebas de campo que permitan calibrarlo.

En cuanto a los resultados obtenidos de las corridas de los ejemplos de aplicación del modelo, se tienen las siguientes observaciones:

a). Para los ejemplos presentados, la concentración de la solución del suelo, bajo las mismas condiciones de H.A., influye entre un 5.5 y 10.4 por ciento en el rendimiento de los cultivos, sin embargo, no puede afirmarse que esta sea una condición para todos los casos que pudieran presentarse.

b). Es factible determinar la cantidad y/o tiempo de aplicación del agua que se requiere para transportar una cantidad de soluto a cierta profundidad, esto resulta ser un aspecto muy importante del modelo, ya que permitiría delimitar adecuadamente las cantidades de agua, y evitar así la salinización del suelo.

c). Es posible evaluar la evolución del equilibrio entre un cultivo y el nivel freático localizado relativamente cerca de la superficie; este es otro aspecto muy importante del modelo, ya que esto permite resolver la cuestión del drenaje agrícola; o sea, la determinación de la profundidad óptima del nivel freático, para obtener la producción máxima de un cultivo.

d). No sólo es posible determinar el momento en que se debe dar el riego, sino también la duración de éste; aunque, hay que mejorar la ecuación de la frontera superior, para que considere con mayor precisión la infiltración del agua bajo condiciones de suelo seco.

e). Si bien, la ecuación propuesta para simular la extracción del agua por el cultivo, permitió obtener valores congruentes, es recomendable ajustarla en cada caso, ya que el coeficiente que se propone en dicha ecuación varía con respecto a la profundidad radicular que se proponga.

f). Sólo es posible calcular el rendimiento de cultivos que sean resistentes a las condiciones de salinidad de suelo y agua de riego bajo las cuales se desee simular, ya que de otra manera el cultivo

simplemente no se desarrollaría.

g). El modelo presenta versatilidad para analizar otros casos, por ejemplo: haciendo que simule iones interactuantes (cationes) químicamente con el suelo; que considere la estratificación del suelo; que tome en cuenta el crecimiento proporcional de la raíz por etapas fenológicas; etc.

h). El modelo se considera una herramienta práctica, que puede ser utilizado, complementariamente con las técnicas de manejo de los suelos salinos, para resolver los problemas de salinidad de los distritos de riego.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr Jesús Gracia S., por todo lo que vale su apreciable apoyo y paciencia como su becario de maestría, así como su gran interés por la realización de este trabajo.

A los M en I Oscar A Fuentes M. y Víctor Franco, por todo el apoyo brindado durante mi estancia como becario de la Sección de Hidráulica, del Instituto de Ingeniería, UNAM.

A mis compañeros Mario Sáenz P., José Colli M., Fernando Rosales C. y Lourdes M Meza T., por compartir conmigo su amistad durante mi formación profesional.

Al Ing. L Eduardo Franco H., por su gran ayuda en la elaboración del programa de cálculo.

REFERENCIAS

1. Bresler, E.B.L. Mc Neal and D.L. Carter. 1982. "Saline and sodic soils, principles-dynamics-modeling". Springer-Verlag, Germany, 236p.
2. Gracia S, Jesús. 1987. "Simulación del movimiento del agua en suelos con presencia de cultivos". Series (azul) del Instituto de Ingeniería, UNAM, 62p.
3. James, D. W, Hanks, R. J. and Jurinak, J. J. 1982. "Modern irrigated soils". John Wiley and Sons, New York, USA.
4. Personal del laboratorio de salinidad de los E.U.A. 1990. "Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos". Limusa-Noriega, México, 172p.
5. Sánchez, B. E.I. 1993. "Descripción del proceso de lavado de los suelos salinos sulfáticos". Tesis de maestría, Colegio de Posgraduados de Chapingo, Edo. de México.
6. Sánchez, B. J. L y Gracia, S. J. 1979. "Agricultural experiments to calibrate a mathematical model for planning irrigation water supplies for crops". Memorias IX Congreso CIGR, I-2-9, Mich, EUA.
7. Sánchez, E. L. 1989. "Simulación de la producción de cultivos de temporal en el Campo Agrícola Experimental de la FES-Cuautitlán, UNAM". Tesis de licenciatura, Ingeniería Agrícola, FES-Cuautitlán, UNAM.

BIBLIOGRAFIA

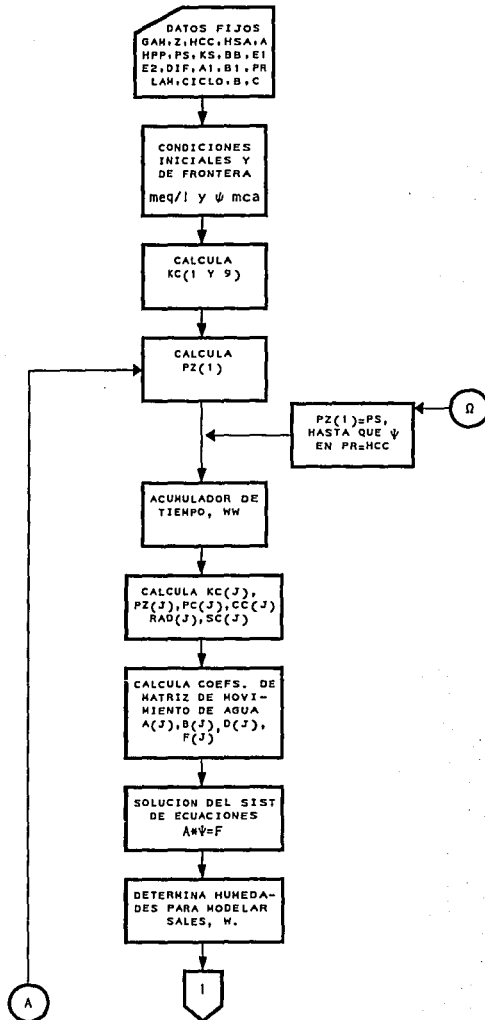
1. Iturbe, A. Rosario. 1986. "Salinidad y disposición de aguas residuales en suelos". Series (azul) del Instituto de Ingeniería, UNAM.
2. I. Shainberg and J. Shalhevet. 1984. "Soil salinity under irrigation (processes and management)". Springer-Verlag, Berlin.
3. E.A. Soholenko. 1986. "Water and salt regimes of soils, modeling and management". A.A. Balkema/Rotterdam, Foridabad, India.
4. Donahue, Roy L; Raymond W. Miller y John C. Shickluma. 1981. "Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas". Prentice Hall, Madrid, España, 624p.
5. Aceves N. Everardo. 1979. "El ensalitramiento de los suelos bajo riego (Identificación, control, combate y adaptación)". Rama de riego y drenaje del Colegio de Posgraduados de Chapingo, Méx.
6. FAO. 1982. "La calidad del agua en la agricultura". Estudio de la FAO, en riego y drenaje No 29, Rev. 1.
7. Fuentes, M. O. y Martínez, A. P. F. 1988. "Introducción a los métodos numéricos aplicados a la hidráulica". Serie de divulgación No 5, Instituto Mexicano de Tecnología del agua, Méx.

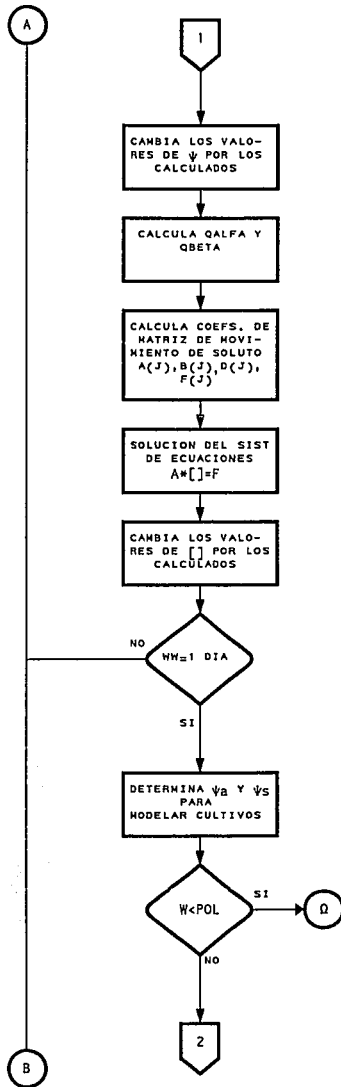
APENDICE
(DIAGRAMA DE FLUJO Y LISTADO DEL PROGRAMA)

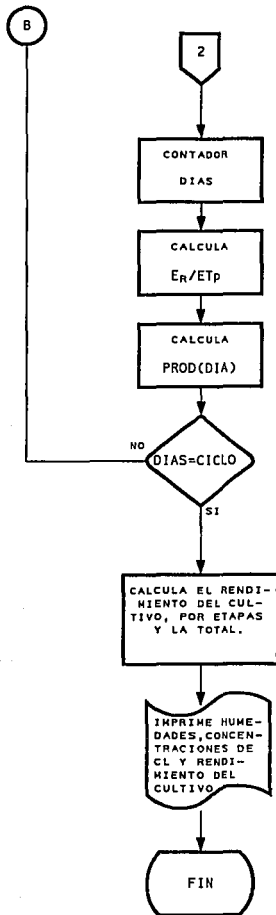
Lista de términos del diagrama de bloques del modelo numérico

- GAM: densidad aparente del suelo.
Z: valor de los intervalos de profundidad del suelo.
HCC: humedad del suelo en capacidad de campo.
HSA: humedad del suelo en saturación.
HPP: humedad del suelo en punto de marchitez permanente.
PS: tensión en saturación.
KS: conductividad hidráulica del suelo.
A, B, C: constantes de la ecuación que relaciona la tensión con la humedad en el suelo, cuando esta es menor que la de capacidad de campo.
BB: exponente de la ecuación de permeabilidad.
E1, E2: constantes de la ecuación que relaciona la tensión con la humedad en el suelo, cuando esta es mayor que la de capacidad de campo.
DIF: coeficiente de difusión del ión cloruro (Cl^-).
A1, B1, LAM: constantes de la ecuación de difusión molecular.
PR: profundidad radicular.
CICLO: duración del ciclo vegetativo del cultivo.
[meq/l]: concentración del soluto en miliequivalentes por litro.
 ψ : tensión del agua en el suelo.
KC(1 y 19): permeabilidad en las fronteras (superior e inferior).
PZ(1): tensión de la humedad en el suelo, en el punto 1.
WW: contador del tiempo de simulación.
KC(J), CC(J): permeabilidades en cada punto de la malla de cálculo.
PZ(J), FC(J): tensión de la humedad en el suelo en diferentes puntos de la malla.
RAD(J): extracción radicular potencial.
SC(J): extracción radicular real.
A(J), B(J),
D(J), F(J): coeficientes de las matrices de agua y sales.
QALFA, QBETA: parámetros para modelar el movimiento de las sales.
W: humedad real en el suelo.
POL: política de humedad aprovechable o política de riego.
 ψ_a : tensión de la humedad causada por las partículas del suelo.
 ψ_s : tensión de la humedad causada por la concentración del soluto.
Er/ETp: relación entre la evapotranspiración real y la potencial.
DIAS: contador de los días del ciclo vegetativo del cultivo.

Figura 4.1. Diagrama de bloques del modelo numérico.







LISTADO DEL PROGRAMA DE CALCULO

DECLARE SUB IMPRESION7 ()
DECLARE SUB IMPRESION8 ()
DECLARE SUB GRAFICO1 ()
DECLARE SUB GRAFICO2 ()
DECLARE SUB GRAFICO3 ()

'50% DE H. A, SUELO NO SALINO, REGADO CON AGUA SIN SAL

'DEFINICION DE LAS CONSTANTES Y VARIABLES DEL PROGRAMA

'CONSTANTES :

'CARACTERISTICAS DEL SUELO

' Z TAMAÑO DE C/U DE LOS 20 INTERVALOS DE LA PROFUNDIDAD
' DEL SUELO, m
' HCC HUMEDAD EN CAPACIDAD DE CAMPO, adim
' HSA HUMEDAD DE SATURACION, adim
' HPP HUMEDAD EN PUNTO DE MARCHITAMIENTO PERMANENTE, adim
' IR NUMERO DE INCREMENTOS EN LA PROFUNDIDAD RADICULAR (DZ)
' PS TENSION DE SATURACION, Joules/kg
' KS PERMEABILIDAD DEL SUELO, cm/s
' A, B, C CONSTANTES DE LA ECUACION QUE RELACIONA LA TENSION CON
' LA HUMEDAD DEL SUELO CUANDO ESTA ES MENOR QUE LA HCC
' E1, E2 CONSTANTES DE LA ECUACION QUE RELACIONA LA TENSION CON LA
' HUMEDAD EN EL SUELO, CUANDO ESTA ES MAYOR QUE LA HCC
' BB EXPONENTE DE LA ECUACION DE PERMEABILIDAD, adim
' GAM DENSIDAD APARENTE DEL SUELO, g/cm³

'CARACTERISTICAS DEL CULTIVO

' GO, G1 CONSTANTES PARA REPRESENTAR LA DENSIDAD RADICULAR
' Ko COEFICIENTE DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO

'CARACTERISTICAS DEL SOLUTO

' A1, B1 CONSTANTES DE LA ECUACION DE DIFUSION MOLECULAR
' LAM CONSTANTE DE LA ECUACION DE DIFUSION CONVECTIVA
' FF COEFICIENTE HIDRODINAMICO DE DIFUSION
' DIF COEFICIENTE DE DIFUSION MOLECULAR EN EL AGUA
' Dh COEFICIENTE DE DIFUSION CONVECTIVA

'CARACTERISTICAS CLIMATICAS

' ETP EVAPOTRANSPIRACION DIARIA, mm

'CONDICIONES DE CALCULO

' TD INCREMENTO EN EL TIEMPO PARA CADA ITERACION, s
' ANTERIOR RESPECTIVAMENTE
' WW ACUMULADOR DE TIEMPO TOTAL DE SIMULACION

' VARIABLES :

' PA(), PB(), PC(), PD(), PZ() TENSION DE LA HUMEDAD EN EL SUELO
' EN DIFERENTES INSTANTES DE CALCULO,
' Joules/Kg
' KC(), CC() PERMEABILIDADES EN CADA PUNTO DE LA
' MALLA DE CALCULO,
' A(), B(), D(), F() COEFICIENTES DEL SISTEMA DE ECUACIONES
' L(), U(), UU(), COE(), X() PARAMETROS DEL METODO PARA RESOLVER
' EL SISTEMA DE ECUACIONES
' ALFA(), BETA(), VV(), WCAL PARAMETROS PARA MODELAR SALES
' QQ()
' PROD(DIAS) ACUMULADOR DIARIO DE LA PRODUCCION DEL
' CULTIVO
' QPD(), QPB() TENSION DEL AGUA EN i-1 E 1
' RESPECTIVAMENTE, PARA MODELAR CULTIVOS
' PI CONDICION DE FRONTERA SUPERIOR EN EL INSTANTE 1
' MU, NU HUMEDADES RELATIVAS
' LT LAMINA MAXIMA APROVECHABLE EN LA ZONA RADICULAR, m
' SC() EXTRACCION RADICULAR REAL
' RAD EXTRACCION RADICULAR POTENCIAL
' WV HUMEDAD DEL SUELO EN i-1, PARA MODELAR SALES
' WN HUMEDAD DEL SUELO EN 1, PARA MODELAR SALES
' PROD PRODUCCION DIARIA DEL CULTIVO
' CICLO DURACION DEL CICLO DE PRODUCCION DEL CULTIVO
' PRODTOT PRODUCCION TOTAL NETA DEL CULTIVO
' REND RENDIMIENTO DE LA PRODUCCION DEL CULTIVO, EN C/U DE SUS ETAPAS
' FENOLOGICAS
' P2 ACUMULADOR DE LA PRODUCCION DEL CULTIVO, EN C/U DE LAS ETAPAS
' FENOLOGICAS
' TENSION RELACION E_r/E_{Tp} , PARA MODELAR CULTIVOS
' TSmat TENSION TOTAL DEL AGUA EN EL SUELO, PARA MODELAR CULTIVOS
' DIAS ACUMULADOR DE TIEMPO PARA SIMULAR CULTIVOS
' TSSal TENSION DEL AGUA EN EL SUELO POR SOLUTO
' TSu VALOR PROMEDIO DE LA TENSION DEL AGUA EN EL SUELO, EN LA PR
' TSc VALOR PROMEDIO DE LAS TENSIONES DEL SUELO, EN LA PR
' CE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA
' CVu PROMEDIO DE LA CONCENTRACION DE SAL, EN LA PR
' Cvc ACUMULADOR DE LOS VALORES DE LA CONCENTRACION DE SAL, DE LA PR
' Triage ACUMULADOR DEL TIEMPO DE RIEGO
' SUMPB ACUMULADOR DE LOS VALORES DE LA TENSION DEL AGUA EN EL SUELO,
' EN LA PR
' PROMPB PROMEDIO DE LA TENSION DEL AGUA EN EL SUELO , EN LA PR
' Triage TIEMPO TOTAL DE RIEGO
' Nriage NUMERO DE RIEGOS DADOS DURANTE EL CICLO VEGETATIVO DEL CULTIVO
' WNIN HUMEDAD INICIAL PARA MODELAR SALES
' CVIN CONCENTRACION DE SAL INICIAL PARA MODELAR SALES

COMMON SHARED Z, WW

DIM SHARED PA(20), PB(20), PD(20), PC(20), CC(20), KC(20), WCAL(20)

DIM SHARED PZ(20), A(20), D(20), B(20), F(20), Dh(20), Dp(20), VV(20)

DIM SHARED L(20), U(20), UU(20), COE(20), X(20), RAD(20), QQ(20),

FF(20), QPD(20), PROD(140)

DIM SHARED SC(20), WV(20), WN(20), CV(20), CN(20), ALFA(20), BETA(20),

QPB(20), WNIN(20), CVIN(20)

```
DIM SHARED WN1(20), WN2(20), WN3(20), WN4(20), WN5(20), CV1(20),  
CV2(20), CV3(20), CV4(20), CV5(20)  
DIM SHARED WN6(20), WN7(20), WN8(20), WN9(20), WN10(20), CV6(20),  
CV7(20), CV8(20), CV9(20), CV10(20)
```

```
SCREEN 12
```

```
CLS
```

```
' INPUT "Nombre del archivo:";  
SAL$ = "C:\SOSIN"  
SAL1$ = SAL$ + ".GCS"  
SAL2$ = SAL$ + ".GHU"  
SAL3$ = SAL$ + ".RCS"  
SAL4$ = SAL$ + ".RHU"  
SAL5$ = SAL$ + ".HUD"  
OPEN "O", #1, SAL1$  
OPEN "O", #2, SAL2$  
OPEN "O", #3, SAL3$  
OPEN "O", #4, SAL4$  
OPEN "O", #5, SAL5$  
' LINE INPUT "Comentario: "; ES$=  
"50%_DE_H.A.,_SUELO_NO_SALINO,_Y_REGADO_CON_AGUA_SIN_SAL"
```

```
PRINT #1, ES$  
PRINT #2, ES$  
PRINT #3, ES$  
PRINT #4, ES$  
PRINT #5, ES$  
PRINT #1, ""  
PRINT #2, ""  
PRINT #3, ""  
PRINT #4, ""  
PRINT #5, ""
```

```
CLS
```

```
' CONSTANTES GENERALES DEL PROGRAMA
```

```
GAM = 1.2  
Z = 0.06  
Z2 = Z * Z  
HCC = 0.34  
HSA = 0.4525  
HPP = 0.2  
TD = 60  
TI = TD  
T = TD  
TV = TD  
PS = 0.01409  
KS = 0.23 / 360000  
A = 0.01979  
B = 5.57  
C = -4.7561
```

```

OA = 0
WW = 0
BB = -2.6725
E1 = 48.494
E2 = 0.36462
DIF = 0.04
A1 = 0.002
B1 = 10
LAM = .12
N = 20
PR = 13
DIAS = 0
CICLO = 120
ETPc = 0
SCC = 0
TTrieg = 0
Nrieg = 0
RIEGO = 0

```

'DEFINICION DEL AREA DE GRAFICACION DE RESULTADOS (HUMEDADES-SALES)

COLOR 14

'PRINT "Humedad en el suelo, % Concentracion de sal en el suelo, meq/l"

COLOR 15

'VIEW PRINT 18 TO 30

135 GOSUB 2100: 'LECTURA DE LOS DATOS DE LAS CONDICIONES INICIALES

'CALCULO DE LAS PERMEABILIDADES EN LAS FRONTERAS, KC(1 y 19)

```

138 FOR J = 1 TO 19 STEP 18
140 IF PZ(J) >= PS THEN 148
143 KC(J) = KS
145 GOTO 150
148 KC(J) = KS * ((PZ(J) / PS) ^ (((-2 * BB) - 3) / BB))
150 NEXT J

```

200 PZ(1) = .5 * (1 + TD / (2 * TV)) * (PB(2) + PB(1)) - .25 * (TD / TV) * (PA(2) + PA(1))

201 GOSUB 3500: 'SELECCION DE LA TENSION EN EL PUNTO PZ(1)

```

IF WW < 300 THEN
  TD = 60
ELSE
  TD = 300: 'GOSUB 1750: 'CALCULO DE LOS TIEMPOS
  TV = TD
END IF

```

'CALCULO DE LAS TENSIONES EN LOS PUNTOS PZ(2-19)

```

206 FOR J = 2 TO 19
210 PZ(J) = .5 * (1 + TD / (2 * TV)) * (PB(J + 1) + PB(J))
  - .25 * (TD / TV) * (PA(J + 1) + PA(J))

```



```

220         NEXT J
      ' CALCULO DE LAS TENSIONES EN LOS PUNTOS PC(J)

240 PC(1) = 0
250     FOR J = 2 TO 19
260         PC(J) = .5 * (PZ(J - 1) + PZ(J))
270     NEXT J
271 PD(20) = PB(19)

      ' ACUMULADOR DE TIEMPO DE SIMULACION

275 WW = WW + TD

      ' CALCULO DEL COEFICIENTE DE VARIACION DE W vs TENSION, CC(2-19)

300     FOR J = 2 TO 19
302         IF PC(J) > 3.3 THEN 310
304         CC(J) = 1 / (E1 * PC(J))
306         GOTO 330
310         CC(J) = (1 * A ^ (1 / B)) / (B * ((PC(J) - C) ^ ((1 +
          B) / B)))
330     NEXT J

      ' CALCULO DE LA PERMEABILIDAD EN LOS PUNTOS KC(1-19)

340     FOR J = 1 TO 19
343         IF PZ(J) >= PS THEN 350
345         KC(J) = KS
347         GOTO 360
350         KC(J) = KS * ((PZ(J) / PS) ^ (((-2 * BB) - 3) /
          BB)):
360     NEXT J
365 KC(1) = (KC(1) * KC(2)) ^ .5

      ' CALCULO DE LA EXTRACCION RADICULAR, RAD(1-10)

      IF RIEGO = 0 THEN

      IF WW < 300 THEN
          FOR J = 1 TO N
              RAD(J) = 0
          NEXT J
      ELSE

          SELECT CASE WW
              CASE IS < 2592000: ' ABRIL
                  Eo = 6
              CASE IS < 5270400: ' MAYO
                  Eo = 7.45
              CASE IS < 7862400: ' JUNIO
                  Eo = 7.11
              CASE IS < 10540800: ' JULIO
                  Eo = 4.69

```

```

CASE IS < 12096000: ' AGOSTO
      Eo = 3.96
END SELECT

SELECT CASE WW
CASE IS < 2073600: ' NACIMIENTO
      Ko = .45
CASE IS < 5184000: ' DESARROLLO VEGETATIVO
      Ko = .84
CASE IS < 7257600: ' FLORACION
      Ko = .98
CASE IS < 10368000: ' MADUREZ
      Ko = .72
END SELECT

ETP = Ko * Eo * .65

367 GO = 0.15:'0.3:'0.2:'0.15: 'PARA PR = 5, 10 y 15 RESPECTIVAMENTE
368 G1 = 0.0105: '0.05: '0.0222
370   FOR J = 1 TO PR
380     RAD(J) = (ETP / (86400000 * Z)) * GO * 1.09
385     GO = GO - G1
390   NEXT J
400   FOR J = PR + 1 TO N
410     RAD(J) = 0
420   NEXT J
END IF

ELSE
  IF RIEGO = 1 AND Trieg < 86400 THEN
    FOR J = 1 TO 20
      RAD(J) = 0
    NEXT J
  END IF
END IF

425 TT = T

430 GOSUB 1000: 'CALCULO DE LA DEMANDA DE AGUA POR LA PLANTA, SC(1-19)
435 T = TT

440 GOSUB 1700: 'CALCULO DE LOS COEFICIENTES A,B,D,F PARA (J=2)
      'CALCULO DE COEFICIENTES A,B,D,F DE LA MATRIZ DE AGUA

460   FOR J = 3 TO 19
470     A(J) = TD * KC(J) / (Z2 * CC(J))
480     D(J) = TD * KC(J - 1) / (Z2 * CC(J))
490     B(J) = 2 + A(J) + D(J)
500     F(J) = A(J) * PB(J + 1) + (2 - A(J) - D(J)) * PB(J)
502     F(J) = F(J) + D(J) * PB(J - 1) + 2 * Z * (A(J) - D(J))
           + TD * (SC(J + 1) + SC(J)) / CC(J)
510   NEXT J
530 F(19) = F(19) + A(19) * PD(20)

```

535 GOSUB 1300: 'CAMBIO DE SIGNO DE LOS COEFICIENTES A, D, B DE LA
MATRIZ DE AGUA

'SOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES DE LA MATRIZ DE AGUA

```
540 L(3) = D(3) / B(2)
541 N = 20
550   FOR J = 4 TO N
560     L(J) = D(J) / (B(J - 1) - A(J - 2) * L(J - 1))
570   NEXT J
580 U(2) = B(2)
590   FOR J = 3 TO N - 1
600     U(J) = B(J) - A(J - 1) * L(J)
610   NEXT J
620   FOR J = 2 TO N
630     UU(J) = A(J)
640   NEXT J
650 COE(2) = F(2)
660   FOR J = 3 TO N - 1
670     COE(J) = F(J) - COE(J - 1) * L(J)
680   NEXT J
690 X(N - 1) = COE(N - 1) / U(N - 1)
700   FOR J = N - 1 TO 2 STEP -1
710     X(J) = (COE(J) - UU(J) * X(J + 1)) / U(J)
720   NEXT J
```

'TRANSFORMACION DE LAS TENSIONES EN HUMEDADES PARA MODELAR SALES

```
721   FOR J = 1 TO N
      IF PB(J) < 3.3 THEN
          WV(J) = E2 - LOG(PB(J)) / E1
      ELSE
722         WV(J) = (A / (PB(J) - C)) ^ (1 / B)
      END IF
      IF X(J) < 3.3 THEN
          X(1) = PZ(1)
          X(20) = PB(20)
          WN(J) = E2 - LOG(X(J)) / E1
      ELSE
723         WN(J) = (A / (X(J) - C)) ^ (1 / B)
      END IF
724   NEXT J
```

'GENERACION DE TENSIONES PARA MODELAR SALES

```
725   FOR J = 2 TO N - 1
726     QPD(J) = X(J)
727     QPB(J) = PB(J)
728   NEXT J
729   QPD(1) = PZ(1): QPB(1) = PB(1)
      QPD(20) = PB(19): QPB(20) = PB(20)
```

'CAMBIO DE LAS TENSIONES VIEJAS POR LAS NUEVAS

```
750     FOR J = 1 TO 20
760     PA(J) = PB(J)
762 ' GOTO 770
765     IF X(J) > PS THEN 770
768     X(J) = PS
770     PB(J) = (X(J)): X(J) = 0
772     NEXT J
```

'CALCULO DE TENSIONES PARA MODELAR CULTIVOS

```
IF WW MOD 86400 = 0 THEN
    TSc = 0
    FOR J = 1 TO PR
        TSc = TSc + PB(J)
    NEXT J
    TSu = TSc / PR
    Hum = (A / (TSu - C)) ^ (1 / B)
END IF
```

```
773 TV = TD
775 PB(1) = PZ(1)
777 PB(20) = PB(19) ' PS ' PD(20)
779 PI = PZ(1)
```

788 GOSUB 3000: 'TRANSFORMACION DE LAS TENSIONES A HUMEDADES EN %

GOTO 10200: 'SE VA A MODELAR SALES

'CALCULO DE LA DEMANDA DE AGUA POR LA PLANTA, SC(1-19)

```
1000 IF WW < 300 THEN
    FOR J = 1 TO 19
        SC(J) = 0
    NEXT J

    ELSE
        FOR J = 1 TO 19
            1010     T = PC(J)
            1020     T = T * 10
            1025     T = T * 10
            1030     IF ETP < 2 THEN 1110
            1040     IF ETP < 4.1 THEN 1090
            1050     IF ETP < 6.4 THEN 1070
            1060     ETP = 6.4
            1070     R = 1 / (1 + (T / (888 - 128 * ETP)) ^ 2): GOTO 1120
            1080
            1090     R = 1 / (1 + (T / (1386 - 250 * ETP)) ^ 2): GOTO 1120
            1100
            1110     R = 1 / (1 + (T / (4118 - 1613 * ETP)) ^ 2)
            1120     SC(J) = R * RAD(J)
        NEXT J
    END IF
```

1140 RETURN

' CAMBIO DE SIGNO DE LOS COEFICIENTES A,B,D DE LA MATRIZ DE AGUA

```
1300     FOR J = 1 TO 20
1310         A(J) = -1 * A(J)
1320         D(J) = -1 * D(J)
1325         B(J) = 1 * B(J)
1330     NEXT J
1340 RETURN
```

' CALCULO DE LOS COEFICIENTES A,B,D, PARA J=2, DE LA MATRIZ DE AGUA

```
1700 A(2) = TD * KC(2) / (Z2 * CC(2))
1710 D(2) = (TD * KC(1) / (Z2 * CC(2))) * 2
1720 B(2) = 2 + A(2) + D(2)
1730 F(2) = A(2) * PB(3) + (2 - A(2) - D(2)) * PB(2)
1732 F(2) = F(2) + D(2) * PI + 2 * Z * (A(2) - (D(2) / 2)) + (TD *
      (SC(3) + SC(2)) / CC(2)) + D(2) * PZ(1)
1740 RETURN
```

' CALCULO DE TIEMPOS

```
1750 TA = .015 * Z / (KC(1) * ABS(1 + (PZ(1) - PC(2)) / (Z / 2)))
1760 TB = .015 * Z / (KC(19) * ABS(1 + (PC(19) - PZ(19)) / (Z / 2)))
```

```
      TA = INT(TA)
      TB = INT(TB)
```

```
1770     IF TA > TB THEN
      TD = TB
      ELSE
      TD = TA
      END IF
```

1830 RETURN

' LECTURA DE LOS DATOS PARA CONDICIONES INICIALES

```
2100     FOR I = 1 TO 20
2120         READ PA(I), CV(I)
2130         PB(I) = PA(I)
2140         PC(I) = PB(I)
      IF PA(I) < 3.3 THEN
      WWIN(I) = E2 - LOG(PA(I)) / E1
      ELSE
      WWIN(I) = (A / (PA(I) - C)) ^ (1 / B)
      END IF
      CVIN(I) = CV(I)
      PRINT #1, I * Z, CVIN(I)
      PRINT #2, I * Z, WWIN(I)
2150     NEXT I
      PRINT #1, ""
      PRINT #2, ""
```

'CALL GRAFICO1

'GRAFICACION DE LOS DATOS INICIALES (HUMEDAD-SALINIDAD vs PROFUNDIDAD)

```
CN(1) = CV(1)
CN(N) = CV(N)
2170 PZ(1) = 3.3
2190 PD(20) = 3.3 ' PS
2200 PI = PB(1)
2210 PC(1) = 3.3
2220 PC(20) = 3.3 ' PS
2230 RETURN
```

'ARCHIVO DE LOS DATOS INICIALES DE TENSIONES Y CONCENTRACIONES
'DE SAL PARA UN SUELO SECO, CON Y SIN SAL.

'SUELO HUMEDO Y SALINO

```
2240 DATA 3.3,20,3.3,20,3.3,20,3.3,20,3.3,20
2245 DATA 3.3,20,3.3,20,3.3,20,3.3,20,3.3,20
2250 DATA 3.3,20,3.3,20,3.3,20,3.3,20,3.3,20
2255 DATA 3.3,20,3.3,20,3.3,20,3.3,20,3.3,20
```

'TRANSFORMACION DE LAS TENSIONES A HUMEDADES EN %

```
3000 L = 0
3010 FOR I = 2 TO 19
3020 IF PA(I) > 3.3 GOTO 3050
3022 IF PA(I) > 0 THEN 3030
3024 MU = HSA: GOTO 3040
3030 MU = E2 - LOG(PA(I)) / E1
3040 GOTO 3060
3050 MU = (A / (PA(I) - C)) ^ (1 / B)
3060 IF PB(I) > 3.3 GOTO 3090
3062 IF PB(I) > 0 THEN 3070
3064 NU = HSA: GOTO 3080
3070 NU = E2 - LOG(PB(I)) / E1
3080 GOTO 3100
3090 NU = (A / (PB(I) - C)) ^ (1 / B)
3100 WN(I) = NU
3110 L = L + 1 * Z * 1.2 * (MU - NU)
3120 NEXT I
3130 IF PA(1) > 3.3 GOTO 3160
3132 IF PA(1) > 0 THEN 3140
3134 MU = HSA: GOTO 3150
3140 MU = E2 - LOG(PA(1)) / E1
3150 GOTO 3170
3160 MU = (A / (PA(1) - C)) ^ (1 / B)
3170 IF PB(1) > 3.3 GOTO 3200
3172 IF PB(1) > 0 THEN 3180
3174 NU = HSA: GOTO 3190
3180 NU = E2 - LOG(PB(1)) / E1
3190 GOTO 3210
```

```

3200 NU = (A / (PB(1) - C)) ^ (1 / B)
3210 WN(1) = NU
3220 L = L + .5 * Z * 1.2 * (MU - NU)
3230     IF PA(20) > 3.3 GOTO 3260
3232     IF PA(20) > 0 THEN 3240
3234 MU = HSA: GOTO 3250
3240 MU = E2 - LOG(PA(20)) / E1
3250 GOTO 3270
3260 MU = (A / (PA(20) - C)) ^ (1 / B)
3270     IF PB(20) > 3.3 GOTO 3300
3272     IF PB(20) > 0 THEN 3280
3274 MU = HSA: GOTO 3290
3280 NU = E2 - LOG(PB(20)) / E1
3290 GOTO 3310
3300 NU = (A / (PB(20) - C)) ^ (1 / B)
3310 WN(20) = NU
3320 L = L + .5 * Z * 1.2 * (MU - NU)
3330 OA = OA + L

```

' ARCHIVADO DE RESULTADOS DE HUMEDADES

```

    IF WW MOD 86400 = 0 THEN
        PRINT #2, WW / 86400
        FOR J = 1 TO 20
            PRINT #2, J * Z, WN(J)
        NEXT J
        PRINT #2, ""
    END IF

```

' GRAFICACION DE RESULTADOS (HUMEDADES-PROFUNDIDAD)

```

    IF WW MOD 86400 = 0 THEN

```

' CALL GRAFICO2

```

    END IF

```

' CALL IMPRESION7 ' IMPRESION DE RESULTADOS DE HUMEDADES

```

3400 GOSUB 4000: ' DETERMINA LA POLITICA
3410 RETURN

```

' SUB RUTINA PARA LA ENTRADA DE PZ(1) Y RIEGO

```

3500 IF WW < 300 THEN
    PZ(1) = 3.3
    ELSE
        PZ(1) = .5 * (1 + TD / (2 * TV)) * (PB(2) + PB(1)) - .25 * (TD
            / TV) * (PA(2) + PA(1))
    END IF

    IF RIEGO = 1 THEN
        SELECT CASE Trieg
            CASE IS = 0
                PZ(1) = 7

```

```

        CN(1) = CN(1) / 2
    CASE IS = TD
        PZ(1) = 3.3
        CN(1) = CN(1) / 2
    CASE ELSE
        PZ(1) = PS
        CN(1) = .8
    END SELECT
    Trieg = Trieg + TD

' GUARDA RESULTADOS DE RIEGO

    IF (RESRIEG = 0) AND (Trieg MOD 7200 = 0) THEN
        PRINT #3, WW / 86400, Trieg / 60
        FOR J = 1 TO 20
            PRINT #3, J * Z, CV(J)
        NEXT J
        PRINT #3, ""

        PRINT #4, WW / 86400, Trieg / 60
        FOR J = 1 TO 20
            PRINT #4, J * Z, WN(J)
        NEXT J
        PRINT #4, ""
        END IF

        SUMPB = 0
        FOR J = 1 TO PR
            SUMPB = SUMPB + WN(J)
        NEXT J
        PROMPB = SUMPB / PR
        IF (PROMPB > .34) AND (PROMPB < .341) THEN
            RIEGO = 0
            IF RESRIEG = 0 THEN
                PRINT #3, WW / 86400, Trieg / 60
                FOR J = 1 TO 20
                    PRINT #3, J * Z, CV(J)
                NEXT J
                CLOSE #3

                PRINT #4, WW / 86400, Trieg / 60
                FOR J = 1 TO 20
                    PRINT #4, J * Z, WN(J)
                NEXT J
                CLOSE #4

                RESRIEG = 1
            END IF

            TTrieg = TTrieg + Trieg
            Nrieg = Nrieg + 1
        END IF
    END IF
3560 RETURN

```


' "POLITICA"

```
4000 LS = 0
4020 LT = PR * Z * GAM * (HCC - HPP)
4030     FOR I = 2 TO PR
4040         IF WN(I) < HCC THEN 4070
4050 LS = LS + Z * GAM * (WN(I) - HCC)
4060 GOTO 4080
4070 LS = LS + Z * GAM * (HCC - WN(I))
4080 NEXT I
4090 LS = LS + .5 * Z * GAM * ABS(WN(I) - HCC)
4100 RETURN
```

'MODELACION DEL MOVIMIENTO DE LA SAL

10200 GOSUB 13000: 'CALCULO DE LOS COEFICIENTES QALFA Y QBETA

'CALCULO DE LOS COEFICIENTES A, B, D, F, DE LA MATRIZ DE SALES

```
10300     FOR J = 2 TO (N - 1)
10320         MA = -ALFA(J - 1) - BETA(J - 1)
10330         MB = 2 * ALFA(J) + BETA(J) - BETA(J - 1)
10340         MBA = WN(J) + MB
10350         MBD = -WV(J) + MB
10360         MC = -ALFA(J + 1) + BETA(J)
10370     D(J) = MA
10380     B(J) = MBA
10390     A(J) = MC
10400     F(J) = -MA * CV(J - 1) - MBD * CV(J) - MC * CV(J + 1)
10410     NEXT J
10420     F(2) = F(2) - D(2) * CN(1)
10430     D(2) = 0
10440     F(N - 1) = F(N - 1) - A(N - 1) * CN(N)
10450     A(N - 1) = 0
```

'SOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES DE LA MATRIZ DE SALES

```
10540 L(3) = D(3) / B(2)
10550     FOR J = 4 TO N
10560         L(J) = D(J) / (B(J - 1) - A(J - 2) * L(J - 1))
10570     NEXT J
10580 U(2) = B(2)
10590     FOR J = 3 TO N - 1
10600         U(J) = B(J) - A(J - 1) * L(J)
10610     NEXT J
10620     FOR J = 2 TO N
10630         UU(J) = A(J)
10640     NEXT J
10650 COE(2) = F(2)
10660     FOR J = 3 TO N - 1
10670         COE(J) = F(J) - COE(J - 1) * L(J)
10680     NEXT J
10690     X(N - 1) = COE(N - 1) / U(N - 1)
10700     FOR J = N - 1 TO 2 STEP -1
10710         X(J) = (COE(J) - UU(J) * X(J + 1)) / U(J)
```

```

10720         NEXT J
10731 REM

'CAMBIA VIEJAS CONCENTRACIONES DE SAL POR LAS NUEVAS

      X2 = X(2)
      CV1 = CV(1)
10750     FOR J = 1 TO 20
           IF X(J) < 0 THEN X(J) = 0
10760           CV(J) = X(J)
           X(J) = 0
10770     NEXT J

'CALCULO DE LA TENSION POR SOLUTO

IF WW MOD 86400 = 0 THEN
  Cvc = 0
  FOR J = 1 TO PR
    Cvc = Cvc + CV(J)
  NEXT J
  CVu = Cvc / PR
  IF CVu > 120 THEN
    CE = (CVu + 26.7) / 14.5
  ELSE
    CE = CVu / 10
  END IF
  TSsal = .36 * CE
  TSmat = TSsal + TSu
  PRINT #5, USING "#####.#####  ##.#####"; WW / 86400;
           Hum; TSmat
  SUMPB = 0
  FOR J = 1 TO PR
    SUMPB = SUMPB + WN(J)
  NEXT J
  PROMPB = SUMPB / PR

  IF PROMPB < .27 THEN 'politica de riego
    RIEGO = 1
    Trieg = 0
    IF (Trieg = 0) AND (RESRIEG = 0) THEN
      CV(1) = CN(1)
      CV(20) = CN(20)
      CN(20) = CV(19)
      PRINT #3, WW / 86400, Trieg / 60
      FOR J = 1 TO 20
        PRINT #3, J * Z, CV(J)
      NEXT J
      PRINT #3, ""

      PRINT #4, WW / 86400, Trieg / 60
      FOR J = 1 TO 20
        PRINT #4, J * Z, WN(J)
      NEXT J
      PRINT #4, ""
    END IF

```

```

        END IF
    END IF
10780 CV(1) = CN(1)
10785 CV(20) = CN(20): CN(20) = CV(19) '70 'CV(19)

```

```
'ARCHIVADO DE RESULTADOS DE CONCENTRACION DE SALES
```

```

    IF WW MOD 86400 = 0 THEN
        PRINT #1, WW / 86400
        FOR J = 1 TO 20
            PRINT #1, J * Z, CV(J)
        NEXT J
        PRINT #1, ""
    END IF

```

```
'GRAFICACION DE RESULTADOS (SALINIDAD-PROFUNDIDAD)
```

```
IF WW MOD 86400 = 0 THEN
```

```
'CALL GRAFICOS3
```

```
END IF
```

```
'CALL IMPRESION8 'IMPRESION DE RESULTADOS DE CONCENTRACION DE SAL
```

```
PRINT USING "####.##   ###.#####   #.#####"; WW / 86400; PZ(1)
```

```

    SELECT CASE WW
        CASE IS < 300
            CN(1) = 20
        CASE ELSE
            CN(1) = (CV1 + X2) / 2
    END SELECT

```

```
'SIMULACION DE LA PRODUCCION DE CULTIVOS
```

```

    IF WW MOD 86400 = 0 THEN
        PRINT TSmat
        TSmat = TSmat * 10
        DIAS = DIAS + 1
    END IF

```

```
'CALCULO DE LA RELACION Ea/ETP DIARIA
```

```

    SELECT CASE ETP
        CASE IS < 2
            TENSION = 1 / (1 + (TSmat / (4118 - 1613 * ETP)) ^ 2)
        CASE IS < 4.1
            TENSION = 1 / (1 + (TSmat / (1386 - 250 * ETP)) ^ 2)
        CASE IS < 7
            TENSION = 1 / (1 + (TSmat / (888 - 128 * ETP)) ^ 2)
        CASE ELSE
            ETP = 6.9
            TENSION = 1 / (1 + (TSmat / (888 - 128 * ETP)) ^ 2)
    END SELECT

```

```
PRINT "Ea/ETp= "; TENSION, TSmat
END SELECT
```

```
TSmat = 0
```

```
'CALCULO DE LA PRODUCCION DEL CULTIVO DIARIA
```

```
PROD = 2 * TENSION - 1
IF PROD < 0 THEN PROD = 0
IF TENSION < .49 THEN PROD = 0
PROD(DIAS) = PROD
END IF
```

```
'CALCULO DE LA PRODUCCION POR ETAPA FENOLOGICA Y TOTAL DEL CULTIVO
```

```
IF DIAS = CICLO THEN
```

```
P2 = 0
```

```
FOR J = 1 TO 24
```

```
P2 = P2 + PROD(J)
```

```
NEXT J
```

```
REND1 = .05 * (P2 / 24)
```

```
PRINT #5, "RENDIMIENTO EN EL NACIMIENTO: "; REND1; "%"
```

```
P2 = 0
```

```
FOR J = 25 TO 60
```

```
P2 = P2 + PROD(J)
```

```
NEXT J
```

```
REND2 = .3 * (P2 / 36)
```

```
PRINT #5, "REND EN DESARROLLO VEGETATIVO: "; REND2; "%"
```

```
P2 = 0
```

```
FOR J = 61 TO 84
```

```
P2 = P2 + PROD(J)
```

```
NEXT J
```

```
REND3 = .5 * (P2 / 24)
```

```
PRINT #5, "RENDIMIENTO EN FLORACION: "; REND3; "%"
```

```
P2 = 0
```

```
FOR J = 85 TO 120
```

```
P2 = P2 + PROD(J)
```

```
NEXT J
```

```
REND4 = .15 * (P2 / 36)
```

```
PRINT #5, USING "RENDIMIENTO EN MADUREZ: ###.### %"; REND4
```

```
PRODTOT = 12 * (REND1 + REND2 + REND3 + REND4)
```

```
PRINT #5, USING "PRODUCCION TOTAL= ###.### ton/ha"; PRODTOT
```

```
PRINT #5, USING " Tiempo de riego total: #####.### Hrs";
```

```
TTrieg / 3600
```

```
PRINT #5, USING " regando ###.## min durante #### veces";
```

```
TTrieg / Nrieg / 60; Nrieg
```

```
CLOSE #1
```

```
CLOSE #2
```

```
CLOSE #3
```

```
END
```

```
END IF
```

```
10790 GOTO 200
```

```
10800 END
```

'CALCULO DE LOS PARAMETROS QQ(I), FF(I), VV(I), ALFA Y BETA

```
13000 FOR I = 1 TO N - 1
13002 QQ(I) = 1 * ((KC(I)) / Z) * (((QPD(I + 1) + QPB(I + 1)) / 2) -
      ((QPD(I) + QPB(I)) / 2) + Z)
13003 NEXT I

13004 FOR I = 1 TO N
13005   WCAL(I) = (WN(I) + WV(I)) / 2
13006 NEXT I

13007 FOR I = 1 TO N
13008   VV(I) = QQ(I) / WCAL(I)
13009 NEXT I

13010 FOR I = 1 TO N
13030   Dp(I) = (DIF / 10000) * A1 * (EXP(B1 * WCAL(I)))
13035   Dh(I) = (LAM / 100) * ABS(VV(I))
13040   FF(I) = Dp(I) + (WCAL(I) * Dh(I))
13050   ALFA(I) = FF(I) * TD / (2 * Z2)
13050   BETA(I) = QQ(I) * TD / (4 * Z)
13100 NEXT I
13110 RETURN
```

SUB GRAFICO1

'GRAFICACION DE LOS DATOS INICIALES (HUMEDAD-SALINIDAD vs
'PROFUNDIDAD)

```
VIEW (20, 20)-(310, 250), 1, 10
WINDOW (-.05, -(21 * Z))-(.5 + .05, Z)
LINE (0, 0)-(0, -Z * 20), 15
LINE (0, 0)-(.5, 0), 15
FOR I = .05 TO .55 STEP .05
  LINE (I, Z / 4)-(I, -Z / 4), 15
NEXT I
FOR I = -Z TO -20 * Z STEP -Z
  LINE (-.005, I)-(.005, I), 15
NEXT I

  LINE (WNIN(1), 0)-(WNIN(1), 0), 0
FOR I = 2 TO 20
  LINE -(WNIN(I), -I * Z), 0
NEXT I

VIEW (330, 20)-(620, 250), 1, 10
WINDOW (-10, -(21 * Z))-(310, Z)
LINE (0, 0)-(0, -Z * 20), 15
LINE (0, 0)-(300, 0), 15
FOR I = 10 TO 300 STEP 10
  LINE (I, Z / 4)-(I, -Z / 4), 15
NEXT I
FOR I = -Z TO -20 * Z STEP -Z
  LINE (-2, I)-(2, I), 15
NEXT I
```

```

    LINE (CVIN(1), 0)-(CVIN(1), 0), 0
  FOR I = 2 TO 20
    LINE -(CVIN(I), -I * Z), 0
  NEXT I

END SUB

SUB GRAFICO2

  'GRAFICACION DE RESULTADOS (HUMEDADES-PROFUNDIDAD)

  VIEW (20, 20)-(310, 250), 1, 10
  WINDOW (-.05, -(21 * Z))-(.5 + .05, Z)
  LINE (0, 0)-(0, -Z * 20), 15
  LINE (0, 0)-(.5, 0), 15
  FOR I = .05 TO .55 STEP .05
    LINE (I, Z / 4)-(I, -Z / 4), 15
  NEXT I
  FOR I = -Z TO -20 * Z STEP -Z
    LINE (-.005, I)-(.005, I), 15
  NEXT I

  FOR I = 1 TO 20
    WN10(I) = WN9(I)
    WN9(I) = WN8(I)
    WN8(I) = WN7(I)
    WN7(I) = WN6(I)
    WN6(I) = WN5(I)
    WN5(I) = WN4(I)
    WN4(I) = WN3(I)
    WN3(I) = WN2(I)
    WN2(I) = WN1(I)
    WN1(I) = WN(I)
    S10 = S10 + WN10(I)
    S9 = S9 + WN9(I)
    S8 = S8 + WN8(I)
    S7 = S7 + WN7(I)
    S6 = S6 + WN6(I)
    S5 = S5 + WN5(I)
    S4 = S4 + WN4(I)
    S3 = S3 + WN3(I)
    S2 = S2 + WN2(I)
    S1 = S1 + WN1(I)
  NEXT I

  LINE (WNIN(1), 0)-(WNIN(1), 0), 0
  FOR I = 2 TO 20
    LINE -(WNIN(I), -I * Z), 0
  NEXT I

  IF S10 <> 0 THEN
    LINE (WN10(1), 0)-(WN10(1), 0), 6
  FOR I = 2 TO 20
    LINE -(WN10(I), -I * Z), 6

```

```

NEXT I
  S10 = 0
END IF
IF S9 <> 0 THEN
  LINE (WN9(1), 0)-(WN9(1), 0), 4
  FOR I = 2 TO 20
    LINE -(WN9(I), -I * Z), 4
  NEXT I
  S9 = 0
END IF

IF S8 <> 0 THEN
  LINE (WN8(1), 0)-(WN8(1), 0), 3
  FOR I = 2 TO 20
    LINE -(WN8(I), -I * Z), 3
  NEXT I
  S8 = 0
END IF

IF S7 <> 0 THEN
  LINE (WN7(1), 0)-(WN7(1), 0), 5
  FOR I = 2 TO 20
    LINE -(WN7(I), -I * Z), 5
  NEXT I
  S7 = 0
END IF

IF S6 <> 0 THEN
  LINE (WN6(1), 0)-(WN6(1), 0), 15
  FOR I = 2 TO 20
    LINE -(WN6(I), -I * Z), 15
  NEXT I
  S6 = 0
END IF

IF S5 <> 0 THEN
  LINE (WN5(1), 0)-(WN5(1), 0), 13
  FOR I = 2 TO 20
    LINE -(WN5(I), -I * Z), 13
  NEXT I
  S5 = 0
END IF

IF S4 <> 0 THEN
  LINE (WN4(1), 0)-(WN4(1), 0), 11
  FOR I = 2 TO 20
    LINE -(WN4(I), -I * Z), 11
  NEXT I
  S4 = 0
END IF

IF S3 <> 0 THEN
  LINE (WN3(1), 0)-(WN3(1), 0), 10
  FOR I = 2 TO 20
    LINE -(WN3(I), -I * Z), 10

```

```

NEXT I
  S3 = 0
END IF

IF S2 <> 0 THEN
  LINE (WN2(1), 0)-(WN2(1), 0), 14
  FOR I = 2 TO 20
    LINE -(WN2(I), -I * Z), 14
  NEXT I
  S2 = 0
END IF

IF S1 <> 0 THEN
  LINE (WN1(1), 0)-(WN1(1), 0), 12
  FOR I = 2 TO 20
    LINE -(WN1(I), -I * Z), 12
  NEXT I
  S1 = 0
END IF

```

END SUB

SUB GRAFICO3

'GRAFICACION DE RESULTADOS (SALINIDAD-PROFUNDIDAD)

```

VIEW (330, 20)-(620, 250), 1, 10
WINDOW (-10, -(21 * Z))-(310, Z)
LINE (0, 0)-(0, -Z * 20), 15
LINE (0, 0)-(300, 0), 15
FOR I = 10 TO 300 STEP 10
  LINE (I, Z / 4)-(I, -Z / 4), 15
NEXT I

FOR I = -Z TO -20 * Z STEP -Z
  LINE (-2, I)-(2, I), 15
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 20
  CV10(I) = CV9(I)
  CV9(I) = CV8(I)
  CV8(I) = CV7(I)
  CV7(I) = CV6(I)
  CV6(I) = CV5(I)
  CV5(I) = CV4(I)
  CV4(I) = CV3(I)
  CV3(I) = CV2(I)
  CV2(I) = CV1(I)
  CV1(I) = CV(I)

```

S10 = S10 + CV10(I)

```

S9 = S9 + CV9(I)
S8 = S8 + CV8(I)
S7 = S7 + CV7(I)

```



```

S6 = S6 + CV6(I)
S5 = S5 + CV5(I)
S4 = S4 + CV4(I)
S3 = S3 + CV3(I)
S2 = S2 + CV2(I)
S1 = S1 + CV1(I)
NEXT I

LINE (CVIN(1), 0)-(CVIN(1), 0), 0
FOR I = 2 TO 20
LINE -(CVIN(I), -I * Z), 0
NEXT I

IF S10 <> 0 THEN
LINE (CV10(1), 0)-(CV10(1), 0), 6
FOR I = 2 TO 20
LINE -(CV10(I), -I * Z), 6
NEXT I
S10 = 0
END IF

IF S9 <> 0 THEN
LINE (CV9(1), 0)-(CV9(1), 0), 4
FOR I = 2 TO 20
LINE -(CV9(I), -I * Z), 4
NEXT I
S9 = 0
END IF

IF S8 <> 0 THEN
LINE (CV8(1), 0)-(CV8(1), 0), 3
FOR I = 2 TO 20
LINE -(CV8(I), -I * Z), 3
NEXT I
S8 = 0
END IF

IF S7 <> 0 THEN
LINE (CV7(1), 0)-(CV7(1), 0), 5
FOR I = 2 TO 20
LINE -(CV7(I), -I * Z), 5
NEXT I
S7 = 0
END IF

IF S6 <> 0 THEN
LINE (CV6(1), 0)-(CV6(1), 0), 15
FOR I = 2 TO 20
LINE -(CV6(I), -I * Z), 15
NEXT I
S6 = 0
END IF

```

```

IF S5 <> 0 THEN
  LINE (CV5(1), 0)-(CV5(1), 0), 13
FOR I = 2 TO 20
  LINE -(CV5(I), -I * Z), 13
NEXT I
  S5 = 0
END IF

IF S4 <> 0 THEN
  LINE (CV4(1), 0)-(CV4(1), 0), 11
FOR I = 2 TO 20
  LINE -(CV4(I), -I * Z), 11
NEXT I
  S4 = 0
END IF

IF S3 <> 0 THEN
  LINE (CV3(1), 0)-(CV3(1), 0), 10
FOR I = 2 TO 20
  LINE -(CV3(I), -I * Z), 10
NEXT I
  S3 = 0
END IF

IF S2 <> 0 THEN
  LINE (CV2(1), 0)-(CV2(1), 0), 14
FOR I = 2 TO 20
  LINE -(CV2(I), -I * Z), 14
NEXT I
  S2 = 0
END IF

IF S1 <> 0 THEN
  LINE (CV1(1), 0)-(CV1(1), 0), 12
FOR I = 2 TO 20
  LINE -(CV1(I), -I * Z), 12
NEXT I
  S1 = 0
END IF

END SUB

SUB IMPRESION7
  IMPRESION DE RESULTADOS DE HUMEDADES

3350 PRINT "***** AGUA *****"
3360   FOR I = 1 TO 16 STEP 5
3370     PRINT USING ".#### "; WN(I); WN(I + 1); WN(I + 2);
3380     WN(I + 3); WN(I + 4)
3380     NEXT I
3390 PRINT "***** AGUA *****"

END SUB

```

SUB IMPRESION8

' IMPRESION DE RESULTADOS DE CONCENTRACION DE SALES

```
PINT "----- SALES -----"  
      FOR I = 1 TO 16 STEP 5  
        PRINT USING "###.####"; CV(I); CV(I + 1); CV(I + 2);  
          CV(I + 3); CV(I + 4)  
      NEXT I  
PRINT "----- SALES -----"
```

END SUB