

COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE SUBCOORDINACIÓN DE CONTAMINACIÓN Y DRENAJE AGRÍCOLA

INFORME FINAL DEL PROYECTO RD-1604.1

REGULACIÓN DEL RÉGIMEN DE HUMEDAD DEL SUELO EN ZONAS TROPICALES

JIUTEPEC, MORELOS, NOVIEMBRE DE 2016

Directorio

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Dr. Felipe Arreguín Cortés
Director General del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Dr. Nahun Hamed García Villanueva
Coordinador de Riego y Drenaje

Dr. Heber Eleazar Saucedo Rojas
Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola

Autores

M.I. Erickdel Castillo Solís
Jefe de Proyecto

Dr. Heber Eleazar Saucedo Rojas
Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola

M.C. Felipe Zatarain Mendoza
Tecnólogo del Agua

M.C. Olga Xochilt Cisneros Estrada
Tecnólogo del Agua

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	1
2. Objetivo	2
3. Área de estudio	2
4. Lineamientos para el establecimiento de un experimento de regulación del régimen de humedad del suelo	7
5. Mediciones de la profundidad del nivel freático en un evento de drenaje controlado	13
6. Modelación	14
7. Conclusiones	30
8. Bibliografía	31

Índice de figuras

Figura 1. Localización de la parcela	2
Figura 2. Sistema de drenaje parcelario subterráneo y topografía de la parcela experimental	3
Figura 3. Ubicación de la estación meteorológica automatizada Pozo de Ibarra	4
Figura 4. Climograma para la estación Pozo de Ibarra, Santiago Ixcuintla, Nayarit.	5
Figura 5. Comportamiento de la profundidad del nivel freático en un evento de drenaje	13
Figura 6. Diagrama de flujo	16
Figura 7. Evolución típica del tirante en la cabecera de una melga durante un riego.....	26
Figura 8. Comportamiento de la profundidad del nivel freático	28
Figura 9. Flujo promedio del agua en la posición de la zona de las raíces	29

Índice de cuadros

Cuadro 1. Ejemplo de las variables climatológicas obtenidas.....	4
Cuadro 2. Temperatura y precipitación promedio.....	5
Cuadro 3. Propiedades físicas del suelo	6
Cuadro 4. Parámetros usados para evaluar la aplicabilidad del sitio para el uso del agua subterránea de los cultivos in-situ	8
Cuadro 5. Profundidad del nivel freático en un evento de drenaje.....	13
Cuadro 6. Características hidrodinámicas del suelo	26
Cuadro 7. Tabla de resultados	27

1. Introducción

En el trópico húmedo mexicano, se concentra el 70% de las tierras de mediano y alto potencial agrícola y el 65% de los recursos hidráulicos. Tiene una área de influencia de 34,239,016 ha distribuida en 581 municipios de 14 estados del territorio nacional: Campeche, Chiapas, Colima, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán de Ocampo, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luís Potosí, Tabasco y Veracruz. En las zonas subhúmedas y en algunas partes de las zonas húmedas del trópico mexicano, aun cuando la precipitación anual es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos agrícolas, generalmente las lluvias se concentran en un período de tiempo muy corto de la estación lluviosa. Esto provoca por un lado problemas de exceso y por el otro déficit de humedad para los cultivos. Este exceso de lluvia en cierta época del año, provoca que los niveles freáticos asciendan, en algunos casos hasta la superficie del suelo.

Con la finalidad de incorporar a la producción agropecuaria estas áreas con problemas de drenaje y riego, localizadas en las zonas húmedas y subhúmedas tropicales del país, fueron creados los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT). Existen 23 DDT, que en el año agrícola 2010 registraron una superficie sembrada de 1,817,472.5 ha, pero se estima que se tiene un potencial de 7.5 millones de hectáreas, en el trópico mexicano.

Es en la región del trópico húmedo y particularmente en los DTT, en donde, debido a sus condiciones climáticas (exceso y déficit de agua en cierta época del año) se necesita realizar un manejo adecuado del régimen de agua en el suelo, mediante el riego y drenaje controlados, por lo que se hace necesario realizar estudios del régimen de humedad del suelo, tomando en cuenta la lluvia, el aporte de agua del manto freático, el drenaje subterráneo controlado y la subirrigación.

En las pasadas décadas, ha habido un considerable progreso en el mejoramiento del diseño y gestión de los sistemas de riego, sin embargo, ha habido poca investigación dedicada al diseño e implementación de mejoras de los sistemas y gestión integrada de los sistemas de drenaje subterráneo.

2. Objetivo

El objetivo de este trabajo es la verificación en campo de un proceso de regulación del régimen de humedad del suelo aplicando riego y drenaje y modelación del proceso.

3. Área de estudio

La parcela experimental, pertenece al Módulo de Riego Margen Derecha del Río Santiago, el cual, forma parte del Distrito de Riego 043 Estado de Nayarit y se localiza en la planicie costera del Noroeste del estado, entre los meridianos 21°50' latitud norte y 105°07' longitud oeste. Entre los principales cultivos que se establecen en la zona, destacan el tabaco, frijol, maíz y hortalizas.

La parcela experimental se localiza en el ejido del el Puente perteneciente al municipio de Santiago Ixcuintla (figura 1). La parcela tiene una superficie de 6.0 ha y cuenta con sistema de drenaje parcelario subterráneo (figura 2), hidrantes para regar por gravedad y estructuras de control del manto freático.

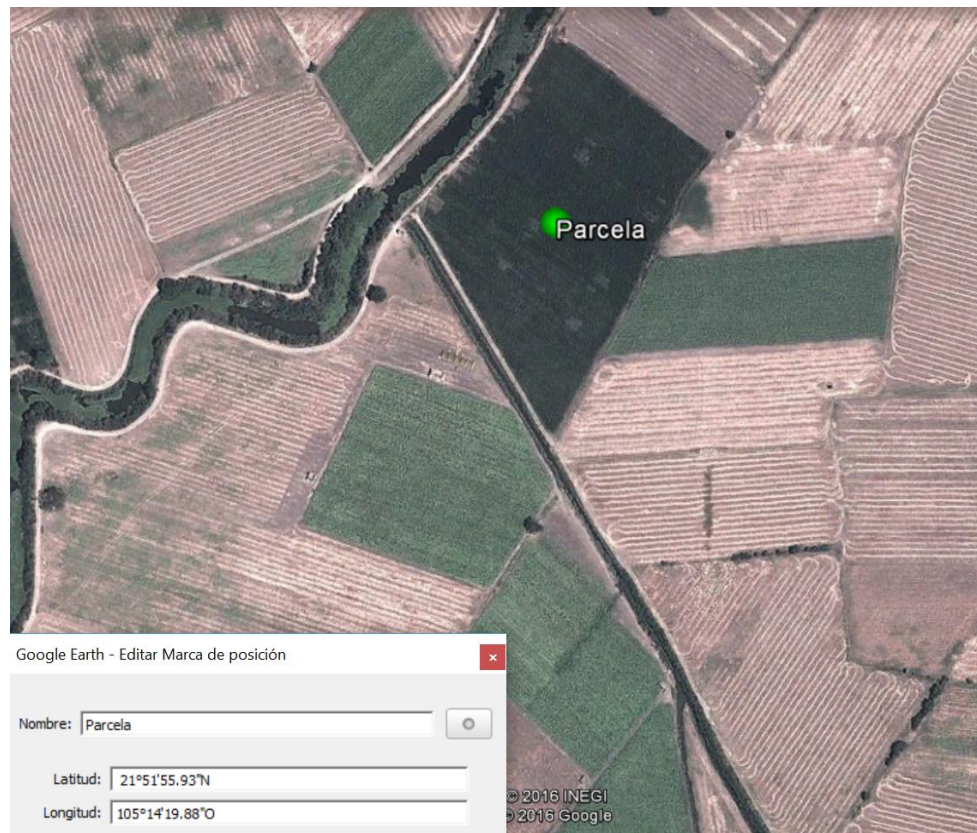


Figura 1. Localización de la parcela

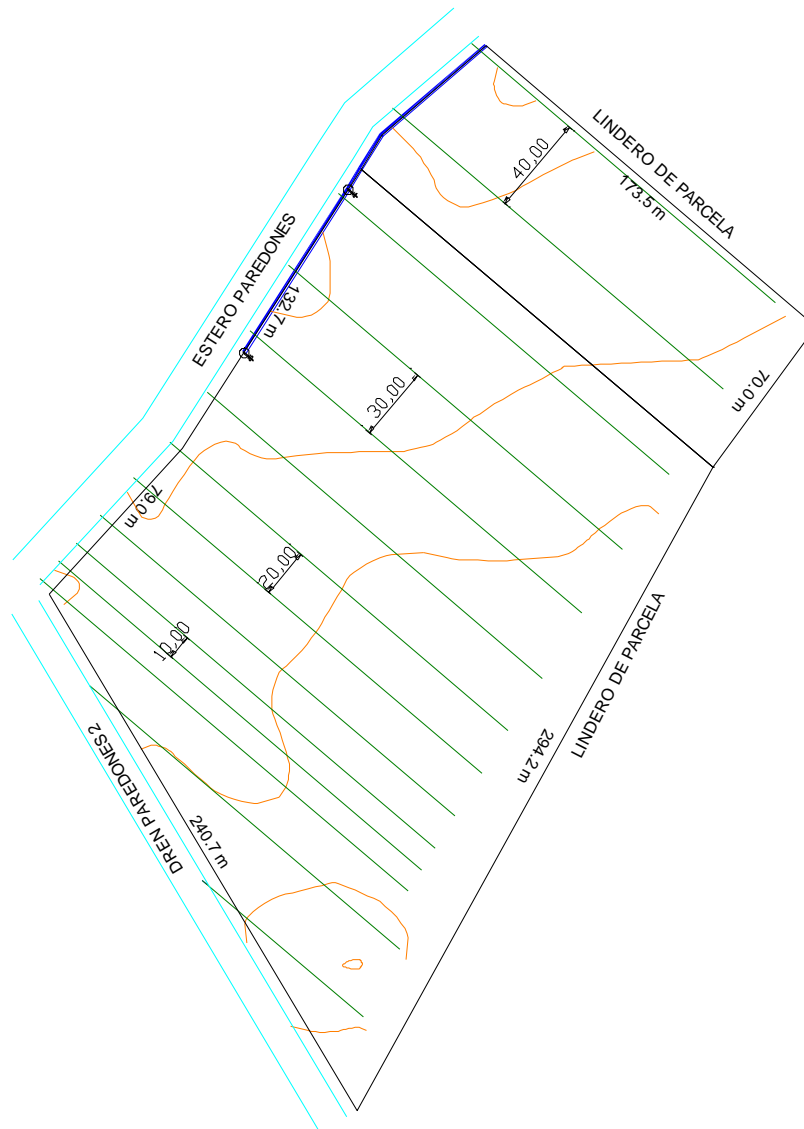


Figura 2. Sistema de drenaje parcelario subterráneo y topografía de la parcela experimental

Aproximadamente a 4 km de la parcela experimental, se encuentra una estación meteorológica automatizada del INIFAP, en la población Pozo de Ibarra (figura 3). De esta estación se obtuvieron las variables climatológicas mostradas en el cuadro 1. Los registros abarcan las fechas entre el 1 de enero de 2007 y 10 de septiembre de 2014.

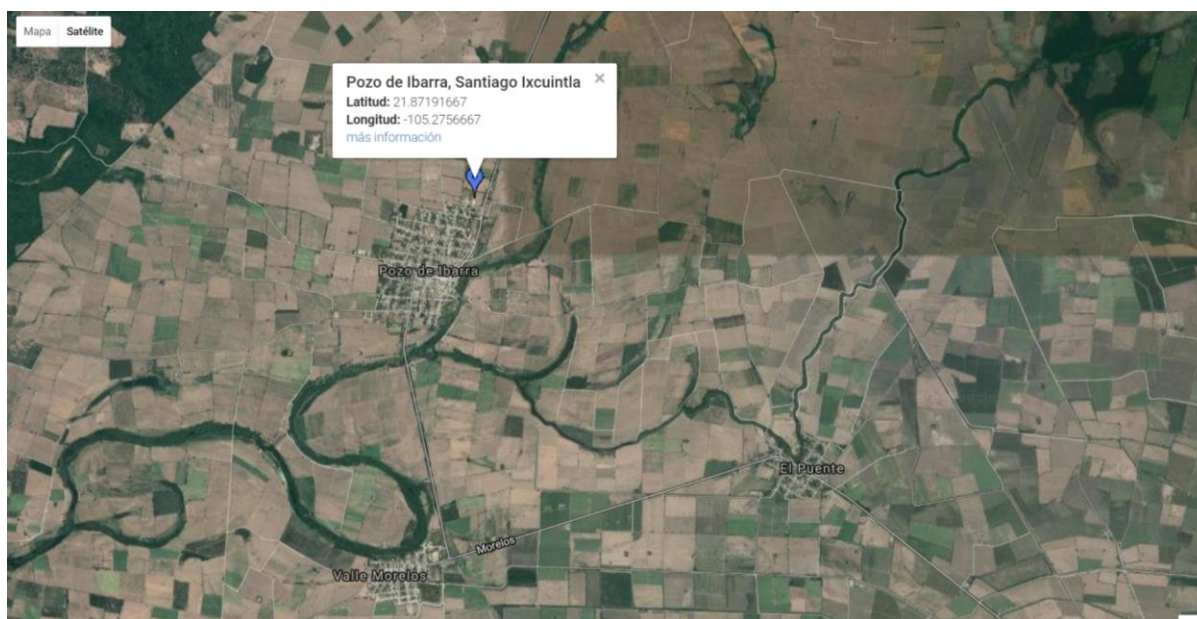


Figura 3. Ubicación de la estación meteorológica automatizada Pozo de Ibarra

Cuadro 1. Ejemplo de las variables climatológicas obtenidas

Fecha	Temp	Tmax	Tmin	Hr	Rs	Prec	Dv	Vv	Racha
04/01/2007 00:00	19.3	27.9	12.4	96	0	0	Suroeste	2	13.5
05/01/2007 00:00	20.3	30.7	11.3	96	0	0	Sur	1	12.7
06/01/2007 00:00	20.1	28.5	13.7	96	0	0	Sur	2.2	20.9
07/01/2007 00:00	20.5	27.1	15.8	96	0	0	Sur	2.1	13.1
08/01/2007 00:00	21.5	29.5	15.1	95	0	0	Sur	0.9	10.9
09/01/2007 00:00	22.1	32.6	15.1	95	0	0	Suroeste	2.1	16
10/01/2007 00:00	21.3	30.6	13.8	94	0	0	Sur	1.8	14.8
11/01/2007 00:00	21.2	27.7	16	96	0	0	Suroeste	1.6	10.9
12/01/2007 00:00	23	31.2	18.3	94	0	0	Sur	1.6	12.9
13/01/2007 00:00	21.1	28.4	15.8	96	0	0	Sur	1.7	15.6
14/01/2007 00:00	21	29.5	16.1	95	0	0	Sur	1.7	20.7
15/01/2007 00:00	20.5	27.8	16	94	0	0	Suroeste	2	16.6
16/01/2007 00:00	21.3	30.6	16.6	95	0	0	Suroeste	2.2	25.6
17/01/2007 00:00	21.9	31	16	94	0	0	Suroeste	2.1	17.6
18/01/2007 00:00	22.9	32.9	15.5	96	0	0	Suroeste	1.6	12.1
19/01/2007 00:00	22.3	31.3	17.8	96	0	0	Suroeste	2.2	17.6
20/01/2007 00:00	19.2	22.9	16.3	69	0	0.2	Sur	2.3	15.6
21/01/2007 00:00	19.8	27	15.5	96	0	0	Suroeste	1.6	15.2
22/01/2007 00:00	18.5	22	15.2	96	0	0	Oeste	1.8	11.7
23/01/2007 00:00	16.9	19.2	15.2	85	0	0.2	Sur	1.7	14.5
24/01/2007 00:00	18	25	13.8	96	0	2	Sur	1.9	12.7

Con los datos de las variables climatológicas se realizó el climograma, el cual refleja el comportamiento anual de los elementos climáticos más importantes como son la precipitación y la temperatura (figura 4). En él se observa que entre los meses de julio y septiembre se presenta un exceso de humedad, y de octubre a junio un déficit. El clima del área de estudio es cálido, con humedad intermedia, con régimen de lluvias en verano, y poca oscilación de la temperatura Aw1(w)(i').

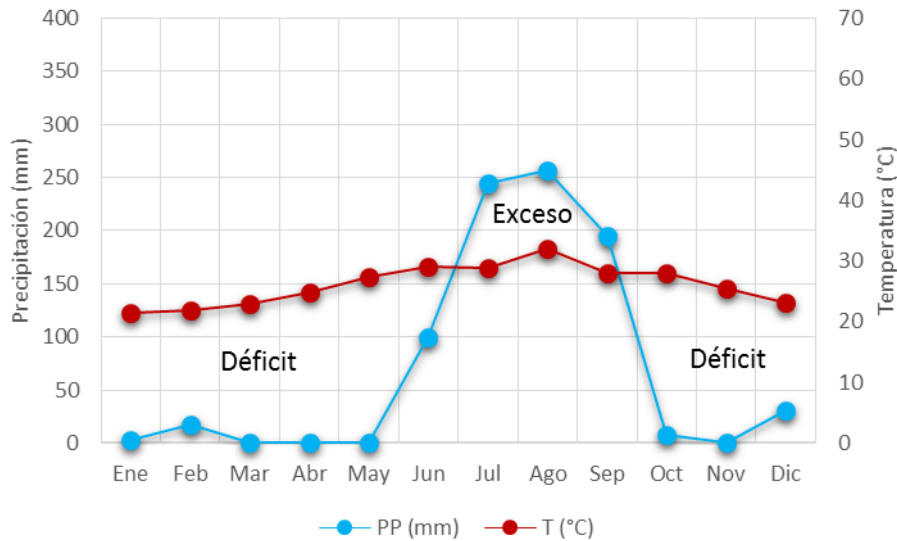


Figura 4. Climograma para la estación Pozo de Ibarra, Santiago Ixcuintla, Nayarit.

Cuadro 2. Temperatura y precipitación promedio

Mes	T (°C)	PP (mm)
Ene	21.42	3.33
Feb	21.92	17.30
Mar	22.89	0.06
Abr	24.75	0.00
May	27.33	0.05
Jun	29.10	99.85
Jul	28.80	245.17
Ago	32.12	256.68
Sep	28.01	195.46
Oct	27.98	7.76
Nov	25.54	0.12
Dic	23.09	31.24
Anual	26.08	857.01

En el cuadro 3, se presentan las propiedades físicas del suelo, presente en la parcela experimental. La textura que predomina es la franco limosa, con una capacidad de campo promedio de 27%, punto de marchitez permanente de 11.9% y densidad aparente de 1.25 g/cm³.

Cuadro 3. Propiedades físicas del suelo

Horizonte	Profundidad (cm)	Textura	Da (g/cm ³)	CC (%)	PMP (%)	HA (%)	HA (cm / 30cm)
1	30	Franco limosa	1.24	27.2	10.9	16.3	6.1
2	60	Franco limosa	1.25	26.8	12.9	13.9	10.4

4. Lineamientos para el establecimiento de un experimento de regulación del régimen de humedad del suelo

Para conocer si en un sitio se puede realizar un experimento de regulación del régimen de humedad del suelo aplicando riego y drenaje controlado, particularmente, utilizando el agua superficial somera, se debe de obtener las siguientes características del manejo del suelo y del agua, de acuerdo a los patrones de cultivo propuestos (Ayars et al., 2006).

Agua subterránea

La salinidad, concentración de boro, la fuente de las aguas subterráneas (percolación profunda, de flujo lateral), la profundidad inicial y final de las aguas subterráneas, y tasa de cambio, profundidad media del agua subterránea.

Cultivos

Anuales, perennes, tolerancia a la sal, requerimiento total de agua (ETc), días a madurez, período de crecimiento total, respuesta al estrés de la sequía o estrés de oxígeno, profundidad de enraizamiento, días a la máxima profundidad de enraizamiento, período total de crecimiento del cultivo, anual, perene, fibroso.

Sistema de riego y gestión

Tipo de sistema, frecuencia de riego, lámina de riego, la calidad del agua de riego.

Sistema de Drenaje

Presencia del sistema de drenaje, configuración (profundidad de laterales, separación lateral, posición lateral con respecto a la superficie), gravedad, bombeo.

Tipo de suelo

Arcilloso, franco, franco arcilloso limoso, etc.

Obtenidos los datos anteriores, se evalúa si las condiciones son idóneas de acuerdo a los valores mostrados en el siguiente cuadro.

Cuadro 4. Parámetros usados para evaluar la aplicabilidad del sitio para el uso del agua subterránea de los cultivos in-situ

Cociente	Valor
EC (agua subterránea)/Umbral Maas-Hoffman de la pérdida de rendimiento	≤ 2
Días a la madurez/Periodo total de crecimiento	<0.5
Máxima profundidad de enraizamiento/Profundidad media del nivel freático (parte superior de la franja capilar)	>0.5
Profundidad efectiva de extracción/ Profundidad del nivel freático cuando se usa el cociente de la ecuación de Meyer Z_r/Z_{max}	<0.4

El objetivo es seleccionar un cultivo que tenga un período prolongado de tiempo para utilizar el agua subterránea poco profunda. Esto requerirá que la zona radicular esté cercana al manto freático por un período prolongado y que el crecimiento de los cultivos no sea limitado por la salinidad. Esto da lugar a las siguientes relaciones, empezando con la selección de cultivos. La relación de la CE del agua subterránea al umbral Maas-Hoffman para la reducción del rendimiento debe ser ≤ 2 . Esto coincidirá con la tolerancia a la salinidad de la planta a la CE del agua subterránea para maximizar el uso potencial. El número de días para el desarrollo máximo de la raíz entre el número total del periodo de crecimiento, debe ser <0.5 . Esto maximizará el tiempo de oportunidad para que el cultivo utilice el agua subterránea poco profunda. La profundidad máxima de enraizamiento dividida por la profundidad media del manto freático (parte superior de la franja capilar) debe ser > 0.5 . La profundidad de extracción de agua efectiva, dividida por la profundidad del nivel freático debe ser <0.4 , si se utiliza la relación de la ecuación Meyer Z_r/Z_{max} . Esto posicionará la zona de las raíces cerca del nivel freático y maximiza el potencial de flujo.

El uso de agua subterránea superficial es afectado por la profundidad del agua subterránea, calidad del agua, etapa de crecimiento del cultivo, tolerancia a la salinidad del cultivo, frecuencia de riego y lámina aplicada, y si el cultivo es anual o perene, este nivel de complejidad hace esto imposible para conducir experimentos que cubran todos los factores de un solo experimento y la investigación sería enfocada solamente en único componente, por ejemplo, el uso del agua con respecto al profundidad del nivel freático, o la calidad del agua subterránea, o el tipo de suelo (Ayars et al., 2006).

Encontrar sitios que sean adecuados para este tipo de investigación es un problema. Un sitio ideal es uno que tenga un manto freático que no fluctúe o que se pueda controlar, que tenga un suelo que no sea salino, y lo suficientemente grande como para ser representativo de la zona.

En una forma más general, se tiene una metodología para diseño y operación de sistemas de drenaje controlado y riego suplementario, la cual se presenta en el informe del proyecto "Incremento de la producción agrícola mediante el control del régimen de humedad del suelo", elaborado por Lázaro et al., en el año 2011.

El procedimiento seguido para el manejo de régimen de humedad del suelo consistió en:

1) Acondicionamiento del módulo experimental

Lo cual consiste en el buen funcionamiento del sistema de riego y drenaje, terrenos nivelados, instalación de estructuras de control del manto freático, instalación de pozos de observación del nivel freático.

2) Recopilación y análisis de información climatológica

Con la información obtenida de estaciones meteorológicas convencionales o automatizadas se elaboran climogramas con el propósito de graficar el comportamiento anual de los elementos climáticos más importantes como son la precipitación y la temperatura. Se realizan también balances hídricos en el suelo, con el fin de evaluar la disponibilidad de agua para los cultivos y obtener una primera estimación de las necesidades de riego y drenaje para un cultivo y área determinada.

3) Cálculo de calendarios de riego

La programación del riego consiste en determinar los intervalos y láminas de riego (calendario de riego) a fin de satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos. La información de base la constituye el tipo de cultivo y su evapotranspiración potencial, la precipitación efectiva y el tipo de suelo. La programación del riego generalmente se obtiene mediante un balance de agua en el suelo. Este método considera que la zona de raíces es un depósito donde se almacena el agua de riego y lluvia que es usada por el cultivo. El riego se aplica cuando la humedad del suelo baja de un cierto nivel sin provocarle déficit a la planta.

4) Necesidades de drenaje

Los niveles freáticos elevados, producto de la lluvia en zonas húmedas o de sobre riegos en zonas áridas o semiáridas, propician condiciones de aireación insuficientes en la zona radicular de los cultivos provocando problemas de oxigenación deficiente, favorecen el aporte de sales por capilaridad del agua freática, aceleran el incremento de la concentración de sales si la percolación es insuficiente para eliminar por lavado las sales aportadas con el agua de riego, propicia el desarrollo de enfermedades, provocan alteración en la población microbiana, entre otras. El diagnóstico de la magnitud de los problemas de drenaje se realiza a través de la observación sistemática de las variaciones espacio temporales de una red de pozos de observación.

5) Preparación del suelo

Esta labor propicia la buena aireación del suelo, remueve la capa del suelo, incorpora la materia orgánica, reduce la incidencia de plagas, incrementa el control de sales, facilita

las labores de cultivo, mejora la distribución del agua de riego y de temporal, que finalmente mejora el desarrollo de las plantas.

6) Establecimiento del cultivo

Fecha de siembra

La fecha de siembra es un factor limitante en la producción, porque marca el buen o mal establecimiento de los cultivos y su repercusión a través de su ciclo vegetativo. Las necesidades de agua y temperatura, y las condiciones prevalecientes en la zona de estudio son de vital importancia en la delimitación del período óptimo de siembras. Según los días que tarda en llegar a la floración los cultivos se clasifican en: precoces, intermedios y tardíos. Sin embargo, la floración de un cultivo cambia su comportamiento al cambiar de localidad o al modificarse la fecha de siembra. El cambio se debe a que el crecimiento y desarrollo están influenciados por las condiciones ambientales, siendo las variables de temperatura y fotoperiodo las de mayor importancia.

Los cultivos deben establecerse dentro de las fechas de siembra recomendadas por los centros de investigación o por experiencias del personal de instituciones agrícolas oficiales para lograr un desarrollo óptimo de las plantas.

Densidad de siembra

La densidad de siembra, kilos de semilla por hectárea o cantidad de plantas por metro lineal o por hectárea, está en relación directa con la distancias entre surcos y entre plantas, y corresponde a la máxima población de plantas que puede desarrollarse óptimamente, sin que exista disminución en el rendimiento por competencia de agua y nutrientes en el suelo y luz solar en el área foliar. Es conveniente realizar una prueba de germinación previo a la siembra para conocer en forma precisa el porcentaje de germinación de la semilla con el fin de incrementar la densidad de población con el porcentaje del faltante de la semilla no germinada.

Método de siembra.

La siembra se puede realizar utilizando sembradoras mecánicas convencionales (semi-precisión) o de precisión. Es recomendable el uso de las sembradoras de precisión para lograr uniformidad en la distribución de las plantas controlando la distancia entre surcos y plantas, y la profundidad de siembra.

7) Análisis químicos de suelo, agua y planta

El análisis químico del suelo, agua y planta, es una fuente de información valiosa para el manejo de suelos y del cultivo, sin embargo, para que un análisis sea útil, es necesario interpretarlo debidamente.

8) Elaboración, adecuación y aplicación del paquete tecnológico del cultivo por establecer

La fertilización es una de las actividades más importantes en el proceso de producción de los cultivos, debido a ello, esta actividad se realiza de acuerdo a cada tipo de suelo, rotación de cultivos, incorporación de residuos de cosecha, rendimiento esperado, entre otros. Los análisis de suelo permiten conocer las necesidades precisas de cada terreno de acuerdo al cultivo.

Con el uso de fertilizantes pueden lograrse incrementos en el rendimiento de más del 20%, siempre y cuando los demás factores que intervienen sean bien manejados (preparación del suelo, variedad, riegos, control de plagas y enfermedades, y control de malezas).

9) Programación de riegos previo ajuste con muestreos de humedad del suelo

Riegos

El número y época de los riegos de auxilio depende de las condiciones de clima, suelo y cultivos. Es de especial cuidado el intervalo de riegos que va desde el inicio de la floración hasta el llenado de grano.

10) Manejo integrado de plagas y enfermedades,

Las plagas son responsables en alto grado de mermas en el rendimiento, su manejo es determinante para lograr una buena producción. Es frecuente encontrar dos tipos de daños, el directo ocasionado por los insectos al momento de alimentarse, y el indirecto al transmitir enfermedades del tipo viral. El éxito en el manejo de las plagas está en función de la oportunidad en que se utilicen las diferentes medidas de control. Un buen manejo integrado de plagas inicia con el establecimiento del cultivo en las fechas señaladas, mantener libre de malezas al cultivo, bordos y canales para eliminar hospederas de insectos plaga. También es importante monitorear las principales del cultivo, con el fin de determinar el momento de iniciar las acciones de control.

El control integrado es el mejor método para controlar y prevenir daños de las plagas, enfermedades y malas hierbas, las cuales conjuntamente y comúnmente reducen del 20 al 25% de la producción de los cultivos. El control integrado representa la acción conjunta de diferentes métodos a seguir, con el propósito de hacer más económico y efectivo el combate. El combate integrado puede hacerse en los conceptos siguientes: 1) desarrollo de las plantas, 2) biología de los insectos o patógenos, 3) comportamiento de los insectos benéficos y perjudiciales, 4) modo de acción y persistencia de los parasiticidas, 5) prácticas culturales y 6) Manejo de poblaciones de plantas.

11) Monitoreo del nivel freático

El monitoreo del comportamiento del nivel freático es el aspecto más importante para conocer la naturaleza y magnitud de los problemas de drenaje. Las fluctuaciones del manto freático tanto en espacio como en tiempo están íntimamente relacionado con el régimen de humedad y aireación que presenta el suelo en el espesor donde se desarrolla el sistema radicular de las plantas. Cuando el agua invade la zona de raíces, el agua desplaza el aire y obstruye el intercambio de gases entre el suelo y el aire. Por consiguiente, el contenido de oxígeno en el suelo se reduce y la materia orgánica no puede descomponerse aeróbicamente y el proceso anaeróbico se pone en marcha. La descomposición anaeróbica produce compuestos orgánicos reducidos que reaccionan con las sustancias minerales del suelo y producen concentraciones tóxicas de iones de manganeso y sulfato ferroso que afectan el desarrollo de la planta.

12) Apertura y cierre de la compuerta de la estructura de control

La apertura y cierre de la estructura de control se debe hacer en función del contenido de humedad en el suelo. El drenaje subterráneo no debería remover el agua que puede contribuir al crecimiento del cultivo, más allá del punto necesario para establecer una adecuada aireación. Los beneficios del manejo activo en áreas húmedas pueden ser el almacenamiento del agua de lluvia para soportar el crecimiento de los cultivos.

5. Mediciones de la profundidad del nivel freático en un evento de drenaje controlado

Después del establecimiento de las condiciones para la realización del experimento en la parcela, se realizaron mediciones de la profundidad del nivel freático en un evento de drenaje controlado en la parcela experimental, una vez realizadas las mismas se pudieron identificar las tasas de abatimiento del manto freático y el efecto de la estructura de control. Con los datos obtenidos, se calibró el modelo computacional elaborado en este proyecto.

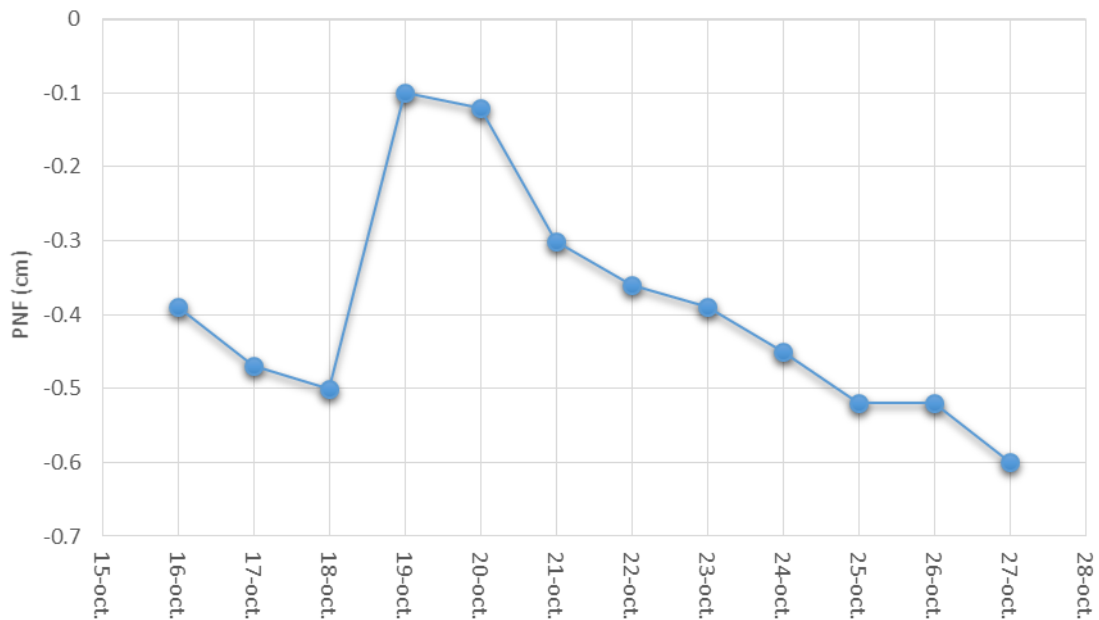


Figura 5. Comportamiento de la profundidad del nivel freático en un evento de drenaje

Cuadro 5. Profundidad del nivel freático en un evento de drenaje

Fecha	PNF (cm)
16-oct	-0.39
17-oct	-0.47
18-oct	-0.5
19-oct	-0.1
20-oct	-0.12
21-oct	-0.3
22-oct	-0.36
23-oct	-0.39
24-oct	-0.45
25-oct	-0.52
26-oct	-0.52
27-oct	-0.6

6. Modelación

Las interacciones fuertes y complejas entre los componentes de riego y drenaje, influenciadas por las variaciones en la precipitación y la demanda evaporativa de la atmósfera, pueden describirse mejor mediante el uso de modelos de simulación numérica que representen adecuadamente los requerimientos de riego, y el movimiento de las sales a través de la zona de la raíz y el flujo hacia a los drenes. Este enfoque integrado de modelado de riego y drenaje es muy útil para evaluar el impacto de diseños alternativos de drenaje y regímenes de riego. En los climas templados húmedos, la evaluación debe centrarse en cómo las condiciones de humedad del suelo afectan el tiempo de labranza, la germinación y la emergencia en la primavera, el desarrollo de los cultivos, el crecimiento y la producción en verano y la trabajabilidad del suelo en otoño (Wesseling y Feddes 2006).

En este trabajo se desarrolló y codificó un algoritmo que permite modelar el régimen de humedad de suelos tropicales, mediante la solución de la ecuación de Richards (1931), en forma de presión, en dos dimensiones (ec. 1):

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right] = 0 \quad 1$$

Donde ψ es el potencial de presión del agua en el suelo, expresado como la altura de una columna equivalente de agua (L), $C(\psi)$ es la capacidad específica de humedad del suelo, y $K(\psi)$ es la conductividad hidráulica que en un suelo parcialmente saturado, la cual es una función del potencial de presión.

El dominio de solución de la ecuación de Richards corresponde con un sistema de drenaje agrícola considerando una geometría bidimensional. Se empleó en el dren, una condición de frontera tipo radiación. La condición de frontera sobre la superficie del suelo se asignó de acuerdo con la evolución en el tiempo del tirante en una melga, durante un riego típico, y se estimó mediante la solución numérica de las ecuaciones de Saint-Venant, las cuales resultan de la aplicación de las leyes de conservación de masa (ec. 2) y cantidad de movimiento (ec. 3).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial l}{\partial t} = 0 \quad 2$$

$$\frac{1}{h} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{2q}{h^2} \frac{\partial q}{\partial x} + \left(g - \frac{q^2}{h^3} \right) \frac{\partial h}{\partial x} + g(J - J_o) + \beta \frac{q}{h^2} \frac{\partial l}{\partial t} = 0 \quad 3$$

donde $q(x,t) = U(x,t)h(x,t)$ es el gasto por unidad de ancho de melga $[L^2T^{-1}]$, es la coordenada espacial en la dirección principal del movimiento del agua en la melga $[L]$; t es el tiempo $[T]$; U es la velocidad media; h el tirante de agua $[L]$; es la pendiente topográfica de la melga $[LL^{-1}]$; J la pendiente de fricción $[LL^{-1}]$; $V_i = \partial I / \partial t$ es el flujo de infiltración $[LT^{-1}]$, es decir el volumen de agua infiltrado en la unidad de tiempo por unidad de ancho y por unidad de longitud de la melga, I es la lámina infiltrada $[L]$; g es la aceleración gravitacional $[LT^{-2}]$; el parámetro adimensional $\beta = 1 - \alpha$, siendo $\alpha = 1 - U_{ix} / U$, donde U_{ix} es la proyección en la dirección del movimiento de la velocidad de salida de la masa de agua debido a la infiltración.

En la siguiente figura, se muestra el diagrama de flujo, el cual se utilizó para la elaboración del código fuente. Este diagrama es una herramienta para el modelado de datos que permite representar las entidades relevantes de un sistema de información así como sus interrelaciones y propiedades.

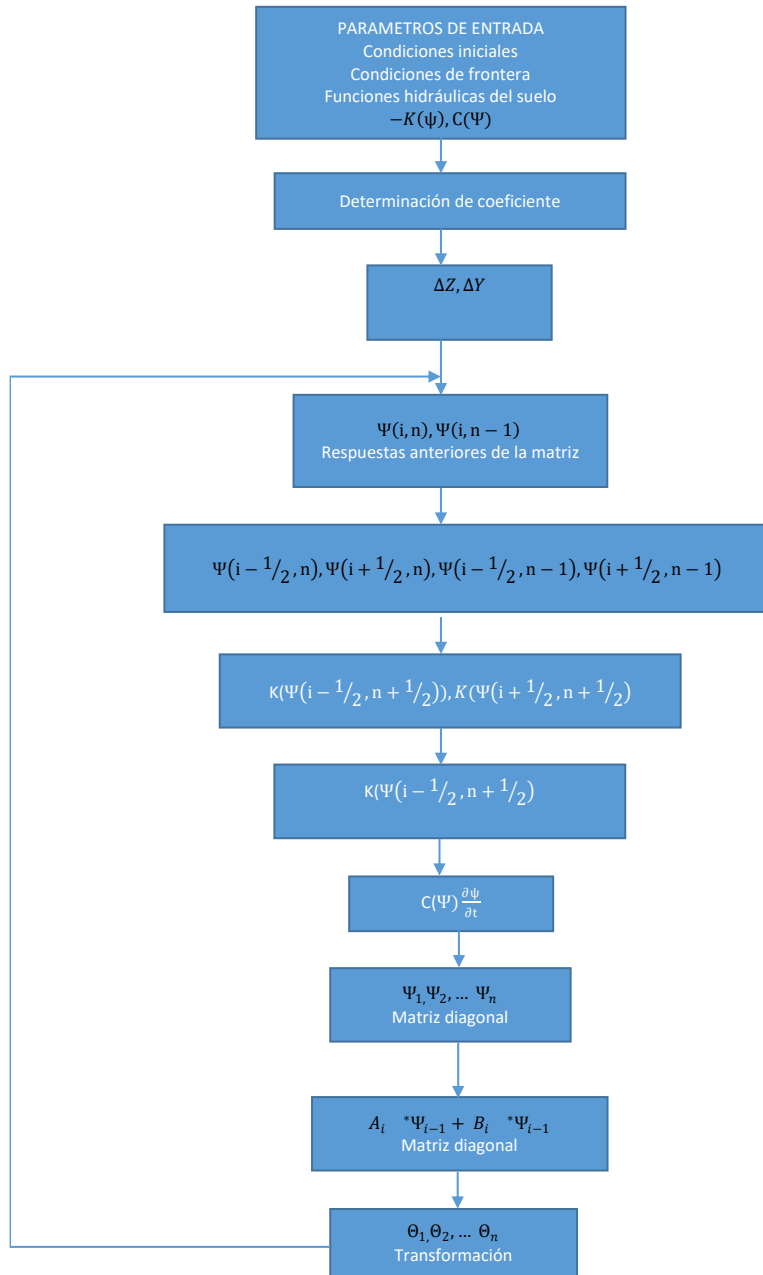


Figura 6. Diagrama de flujo

El código se muestra en las siguientes páginas. Este consta en un código principal, el cual conforme se ejecuta, llama a varias subrutinas.

```
#include<iostream.h>
#include<math.h>
#include<conio.h>
#include<stdlib.h>
#include<fstream.h>
#include<iomanip.h>

class UNO
{
public:
//variables generales
double timp,dtimp,flujo_suelo,dx,dz,lamina;
double dt,tiem,prof,largo,resrec,resR;
long int contaR,contasv,contaco,malla;

//variables Richards
long int *Front,ncx,npz;
long int LV,*Vector;
long int **esq,*Ubicafs,nudosfs,nnuto,nelto,condin;
long int numi;
double *V,*M,*B,*Q,*theta,*thetaini,*Kh,*Cesp,*X,*Z,*potant,*potest,*potcen,*K,omega;

//Rutinas Generales
void Ensamble(); void Pantalla(); void Archivar();

//Rutinas Richards
void Mallael(); void Almac(); void Coeficientes(double *); void GC(double *,double *);
void Matriz(double *); void Rich(); void Frontiera(double*,double*);
void Lamina();
};

void UNO::Mallael()
{
ifstream Lee;
ofstream Escribe;
long int i,con;
long int trani;
long int j,l,e,aux,k,s;
double cj,ck,bj,bk,area;

Escribe.open("c:\\potenciales.txt",ios::trunc);Escribe.close();
Escribe.open("c:\\lamina2d.txt",ios::trunc);Escribe.close();
Escribe.open("c:\\orden.txt",ios::trunc);Escribe.close();

malla=1;

if(malla==0)
{
Lee.open("c:\\nodos2d.txt",ios::in);
Lee>>nnuto;

X=new double[nnuto+1]; Z=new double[nnuto+1]; Front=new long int[nnuto+1];
theta=new double[nnuto+1]; Kh=new double[nnuto+1]; Cesp=new double[nnuto+1];
potant=new double[nnuto+1]; potest=new double[nnuto+1]; potcen=new double[nnuto+1];
V=new double[nnuto+1]; Q=new double[nnuto+1];
```

```

thetaini=new double [nnuto+1];

for (i=0;i<=nnuto;i++)
{theta[i]=0.0; V[i]=0.0; Cesp[i]=0.0;Kh[i]=0.0; Q[i]=0.0;
Front[i]=0; potant[i]=0.0; potest[i]=0.0; potcen[i]=0.0; thetaini[i]=0.;
}

for (i=1;i<=nnuto;i++)
{
Lee>>i>>X[i]>>Z[i];
}
Lee.close();

Lee.open("c:\\elemento2d.txt",ios::in);

Lee>>nelto;

esq=new long int *[nelto+1];

for (int j=1;j<=nelto;j++)
{
esq[j]=new long int[4];

Lee>>j>>esq[j][1]>>esq[j][2]>>esq[j][3];
}

Lee.close();

//ubica y numera nudos en la superficie del suelo
con=0;
for (i=1;i<=nnuto;i++){if (Z[i]==0.0){con++;}}
nudosfs=con;
Ubicafs=new long int [nudosfs+1];

con=0;
for (i=1;i<=nnuto;i++){if (Z[i]==0.0){con++; Ubicafs[con]=i;}}

} //fin de la seleccion de malla0

if (malla==1)
{
prof=50, largo=50;
dx=1.;
ncx=largo/dx;
dz=1.; npz=prof/dz;
trani=npz+1;
numi=(ncx+1)*trani;
nelto=2*(ncx)*(npz);
nnuto=numi;

X=new double[nnuto+1]; Z=new double[nnuto+1]; Front=new long int[nnuto+1];
theta=new double[nnuto+1]; Kh=new double[nnuto+1]; Cesp=new double[nnuto+1];
potant=new double[nnuto+1]; potest=new double[nnuto+1]; potcen=new double[nnuto+1];
V=new double[nnuto+1]; Q=new double[nnuto+1];
thetaini=new double [nnuto+1];

for (i=0;i<=nnuto;i++)
{theta[i]=0.0; V[i]=0.0; Cesp[i]=0.0;Kh[i]=0.0; Q[i]=0.0;
Front[i]=0; potant[i]=0.0; potest[i]=0.0; potcen[i]=0.0; thetaini[i]=0.;
}

```



```

}
esq=new long int *[nelto+1];for (long int j=1;j<=nelto;j++){esq[j]=new long int[4];}

//Nudos
for (i=1;i<=numi;i++){Z[i]=0.; X[i]=0.;}
for (i=1;i<=trani;i++)
{
Z[1]=0.;
Z[i]=Z[i-1]+dz;
}

for (i=(trani+1);i<=numi;i++)
{
Z[i]=Z[i-trani];
X[i]=X[i-trani]+dx;
}

con=1;
//elementos
k=1;
s=npz+1+1;
for (i=1;i<=nelto;i++)
{
esq[i][1]=k;
esq[i][2]=s;
if (i/2<i/2.) esq[i][3]=k+1;
if (i/2==i/2.) esq[i][3]=s+1;
if (i/2==i/2.)s++;
if (i/2<i/2.)k++;

if(i/2==i/2. && (k/(npz+1))==con)k++;
if(i/2==i/2. && (s/(npz+1))==con+1){s++; con++;}
}

//se verifica numeracion
for (e=1;e<=nelto;e++)
{
i=esq[e][1]; j=esq[e][2]; l=esq[e][3];
cj=X[i]-X[l]; ck=X[j]-X[i]; bj=Z[l]-Z[i]; bk=Z[i]-Z[j];
area=((ck*bj-cj*bk)/2.0)*-1.;
if (area<= 0.0){aux=esq[e][2]; esq[e][2]=esq[e][3]; esq[e][3]=aux;}

i=esq[e][1]; j=esq[e][2]; l=esq[e][3];
cj=X[i]-X[l]; ck=X[j]-X[i]; bj=Z[l]-Z[i]; bk=Z[i]-Z[j];
area=((ck*bj-cj*bk)/2.0)*-1.;
if (area<= 0.0){cout<<"area mafufa.... " <<e<<endl;}
}

//ubica y numera nudos en la superficie del suelo
con=0;
for (i=1;i<=nnuto;i++){if (Z[i]==0.0){con++;}}
nudosfs=con;
Ubicafs=new long int [nudosfs+1];

con=0;
for (i=1;i<=nnuto;i++){if (Z[i]==0.0){con++; Ubicafs[con]=i;}}
}

Almac();

```

```

}

void UNO::Almac()
{ ifstream Lee;
  ofstream Escribe;

  Escribe.open("c:\\vectorac2d.txt",ios::trunc);
  Escribe.close();

  long int i, j, *Cont_nudos, *Coef_ren, Contador;
  Coef_ren= new long int [nnuto+1]; Cont_nudos= new long int [nnuto+1];

  for (i=1; i<=nnuto; i++) Cont_nudos[i]=0;

  clrscr();
  gotoxy(10,6);cout<<"Determinando el numero de coeficientes diferentes de cero "<<endl;

  for (i=1; i<=nnuto; i++)
  {
    gotoxy(33,8);cout<<"Nudo = "<<i<<" "<<"de..."<<nnuto<<endl;
    for (j=1;j<=nelto;j++)
    {
      if (i==esq[j][1] || i==esq[j][2] || i==esq[j][3])
      {
        if (i<esq[j][1]) Cont_nudos[esq[j][1]]=esq[j][1];
        if (i<esq[j][2]) Cont_nudos[esq[j][2]]=esq[j][2];
        if (i<esq[j][3]) Cont_nudos[esq[j][3]]=esq[j][3];
      }
    }

    Contador=0;
    for (j=1; j<=nnuto; j++)
    {
      if (Cont_nudos[j]!=0)
      {
        Contador++;
        Cont_nudos[j]=0;
      }
    }

    Coef_ren[i]=Contador;
  }

  LV=0;
  for (i=1; i<=nnuto; i++)
  {
    LV+=Coef_ren[i];
  }
  //cout<<i<<" "<<Coef_ren[i]<<endl;getch();
  }
  LV+=nnuto+1;

  // Vectores

  M = new double [nnuto+1];
  B = new double [nnuto+1];
  K = new double [LV+1];
  Vector = new long int [LV+1];

  for(i=1; i<=nnuto; i++) Cont_nudos[i]=0;

```

```

for(i=1; i<=LV; i++) Vector[i]=0;

for (i=1; i<=nnuto+1; i++)
{
    if (i==1) Vector[i]=nnuto+2;
    else Vector[i]=Vector[i-1]+Coef_ren[i-1];
}

clrscr();
gotoxy(31,6);cout<<" Vector = "<<LV;
gotoxy(19,8);cout<<" Coeficientes del vector de almacenamiento";

for (i=1; i<=nnuto; i++)
{
    gotoxy(32,10);cout<<"Nudo = "<<i<<" "<<"de..."<<nnuto<<endl;
    for (j=1;j<=nelto;j++)
    {
        if (i==esq[j][1] || i==esq[j][2] || i==esq[j][3])
        {
            if (i<esq[j][1]) Cont_nudos[esq[j][1]]=esq[j][1];
            if (i<esq[j][2]) Cont_nudos[esq[j][2]]=esq[j][2];
            if (i<esq[j][3]) Cont_nudos[esq[j][3]]=esq[j][3];
        }
    }

    Contador=0;
    for(j=1; j<=nnuto; j++)
    {
        if (Cont_nudos[j]!=0)
        {
            Vector[Vector[i]+Contador]=j;
            Cont_nudos[j]=0;
            Contador++;
        }
    }
}

void UNO::Coeficientes(double *potcen)
{
    double thetaS,thetaR,Ks,eta,m,n,psient;
    long int i;

    thetaS=0.4865; thetaR=0.; Ks=2.3/3600.; eta=11.; m=.1258; n=2.2878; psient=-32.75;
    for (i=1;i<=nnuto;i++)
        {if (potcen[i]>=0.){theta[i]=thetaS; Kh[i]=Ks; Cesp[i]=0.;}
        if (potcen[i]<0.)
            {theta[i]=thetaR+(thetaS-thetaR)/pow((1+pow((potcen[i]/psient),n)),m);
            Kh[i]=Ks*pow(((theta[i]-thetaR)/(thetaS-thetaR)),eta);
            Cesp[i]=(-m*n*(thetaS-thetaR)/psient)*pow(1.0+pow((potcen[i]/psient),n),-m-
            1.0)*pow((potcen[i]/psient),n-1.0);
            }}
}

void UNO::Matriz(double *potcen)
{
    double c[4],b[4],area,Khe;
    double contrig[4][4];
    int localiza[4];
    long int igl,jgl,l,J,L,e,i,j,r,s,con;

```

```

for (i=1;i<=nnuto;i++){M[i]=0.0; B[i]=0.0;   V[i]=0.0; Q[i]=0.0;}
for(i=1;i<=LV;i++) K[i]=0.0;

for (e=1;e<=nelto;e++)
{
    localiza[1]=1; localiza[2]=2; localiza[3]=3;
    l=esq[e][1]; J=esq[e][2]; L=esq[e][3];

    c[1]=X[L]-X[J]; c[2]=X[l]-X[L]; c[3]=X[J]-X[l];
    b[1]=Z[J]-Z[L]; b[2]=Z[l]-Z[l]; b[3]=Z[l]-Z[J];
    area=((c[3]*b[2]-c[2]*b[3])/2.)*-1.;
    if (area<=0.0){ cout<<"areas negativas en ensamble... "<<e<<endl; getch();}

    Khe=(Kh[l]+Kh[J]+Kh[L])/3.;
    for (r=1;r<=3;r++)
    {for (s=1;s<=3;s++)
    {contrig[r][s]=(Khe*(b[r]*b[s]+c[r]*c[s]))/(4.*area);
    }}}
// Ensamble

for(i=1;i<=nnuto;i++) V[i]=0.;
flujo_suelo=0.;
for(i=1;i<=nnuto;i++)
{
    if (Front[i]==5)
    {
        V[i]+=K[i]*potcen[i];
        for (j=Vector[i];j<=(Vector[i+1]-1);j++)
        {
            V[i]+=K[j]*potcen[Vector[j]];
            V[Vector[j]]+=K[j]*potcen[i];
        }
    }
}

for(i=1;i<=nnuto;i++){if (Front[i]==5){ Q[i]=V[i]-B[i]; flujo_suelo+=Q[i];}}

//multiplicacion de matriz de rigideces y ensamble final
for (i=1;i<=nnuto;i++){B[i]=(M[i]*Cesp[i]/dt)*potant[i]+Q[i]-B[i];}
for (i=1;i<=nnuto;i++){K[i]+=M[i]*Cesp[i]/dt;}

Frontiera(K,B);

}

void UNO::Frontiera(double *K,double*B)
{
    long int i, j;

    for (i=1;i<=nnuto;i++)
    {
        if (Front[i]==5)
        {
            if (i<nnuto)
            {
                for (j=Vector[i];j<=(Vector[i+1]-1);j++)
                {
                    B[Vector[j]]+=-K[j]*potest[i];
                    K[j]=0.;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        K[i]=1.;
        B[i] = potest[i];
    }

    if (i<nnuto)
    {
        for(j=Vector[i];j<=(Vector[i+1]-1);j++)
        {if (Front[Vector[j]]==5){B[i]+=-K[j]*potest[Vector[j]];K[j]=0.;}}
        }
    }
}

void UNO::GC(double *K, double *B)
{
    long int Iteracion, i, j;
    double Norma, Tolerancia, Bnum, Beta;
    double Diferencia, Alf, Aden, Bden;
    double *Vauxiliar,*Residuo,*zz,*P,*AP,*potgc;

    Vauxiliar= new double [nnuto+1];
    Residuo = new double [nnuto+1];
    zz = new double [nnuto+1];
    P = new double [nnuto+1];
    AP = new double [nnuto+1];
    potgc=new double [nnuto+1];

    for(i=1;i<=nnuto;i++){AP[i]=0.;Residuo[i]=0.; Vauxiliar[i]=0.; zz[i]=0.; P[i]=0.;potgc[i]=potant[i];}

    for(i=1;i<=nnuto;i++)
    {
        Vauxiliar[i]+=K[i]*potgc[i];
        if (i<nnuto)
        {
            for(j=Vector[i];j<=(Vector[i+1]-1);j++)
            {
                Vauxiliar[i]+=K[j]*potgc[Vector[j]];
                Vauxiliar[Vector[j]]+=K[j]*potgc[i];
            }
        }
        Residuo[i]=B[i]-Vauxiliar[i];
        Vauxiliar[i]=0.;
    }

    Iteracion=0; Norma=1000; Tolerancia= 1e-5;
    while(Norma>Tolerancia)
    {
        Iteracion++;

        Bnum=0.;
        if(Iteracion==1)Bden=0.;
        for(i=1; i<=nnuto; i++)
        {zz[i]=Residuo[i]/K[i]; Bnum+=zz[i]*Residuo[i];}

        if (Iteracion==1)
        {for(i=1; i<=nnuto; i++)P[i]=zz[i];}

        if (Iteracion>1)
        {Beta=Bnum/Bden;
            for(i=1; i<=nnuto; i++)P[i]=Beta*P[i]+zz[i];
        }
    }
}

```

```

for(i=1; i<=nnuto; i++)
{
    Vauxiliar[i]+=K[i]*potgc[i];
    if (i<nnuto)
    {
        for(j=Vector[i];j<=(Vector[i+1]-1);j++)
        {
            Vauxiliar[i]+=K[j]*potgc[Vector[j]];
            Vauxiliar[Vector[j]]+=K[j]*potgc[i];
        }
        Diferencia=fabs(B[i]-Vauxiliar[i]);
        Vauxiliar[i]=0.;
        if(i==1) Norma=Diferencia;
        if(i!=1 && Diferencia>Norma) Norma=Diferencia;
    }
}
for (i=1;i<=nnuto;i++) potest[i]=potgc[i];

delete [] Vauxiliar;
delete [] Residuo;
delete [] zz;
delete [] P;
delete [] AP;
delete [] potgc;
}

void UNO::Rich()
{
long int i;
double aux;
ofstream Escribe;

Mallael();

dt=1.; tiem=0.;

for(i=1;i<=nnuto;i++) potant[i]=-340.15;
Coeficientes(potant);
for(i=1;i<=nnuto;i++) thetaini[i]=theta[i];
for(i=1;i<=nnuto;i++){ if(Z[i]==0.) {Front[i]=5; potest[i]=2.;} }

do
{
tiem+=dt;
contaR=1;
do
{
Pantalla();

if(contaR==1){for (i=1;i<=nnuto;i++){potcen[i]=potant[i];}}
if(contaR>1){for (i=1;i<=nnuto;i++){potcen[i]=potest[i];}}

Coeficientes(potcen);
Matriz(potcen);
GC(K,B);

contaR++;

```

```

if(contaR>20)break;
}while(resR>.01);

for(i=1;i<=nnuto;i++){potant[i]=potest[i];}

Coeficientes(potest);
Lamina();

Escribe.open("c:\\lamina2d.txt",ios::app);
Escribe<<tiem<<" "<<lamina<<endl;
Escribe.close();

}while (tiem<2.*3600.);
}

void UNO::Lamina()
{
    int i,con,*ordenl,*ubical,nudosl,indicador;
    double difmin,dif,*Zordenl;
    ofstream Escribe;

if(malla==0)
{
con=0;
for(i=1;i<=nnuto;i++){if(X[i]==0.)con++;}
nudosl=con;
ubical=new int [con+1]; ordenl=new int [con+1]; Zordenl=new double [con+1];

for(i=1;i<=nnuto;i++){if(X[i]==0. && Z[i]==0.) ordenl[1]=i;}

con=0; for (i=1;i<=nnuto;i++){if (X[i]==0.0){con++; ubical[con]=i;}}

for(int j=2;j<=nudosl;j++)
{
difmin=100.;
for(i=1;i<=nudosl;i++)
{
if(Z[ordenl[j-1]]!=Zordenl[i]) dif=fabs(Z[ordenl[j-1]]-Zordenl[i]);
if (difmin>dif){difmin=dif; indicador=i; }
}
ordenl[j]=ubical[indicador]; Zordenl[indicador]=100000.;
}

lamina=0.;
for(i=2;i<=nudosl-1;i++)
{
lamina+=((theta[ordenl[i]]-thetaini[ordenl[i]])+(theta[ordenl[i+1]]-thetaini[ordenl[i+1]]))*(Z[ordenl[i+1]]-Z[ordenl[i]])/2.;
}
}

main(void)
{
    UNO Richards2DTercerorden;
    Richards2DTercerorden.Rich();
    return 0.;
}

```

El código para la modelación del régimen de humedad de suelos tropicales utilizando la ecuación de Richards bidimensional se ejecutó para un suelo franco, que tiene las características hidrodinámicas presentadas en el cuadro 6 y para un cultivo de maíz con evapotranspiración de 5 mm/día.

Cuadro 6. Características hidrodinámicas del suelo

Textura	Franco
θ_s (cm ³ /cm ³)	0.5245
θ_r (cm ³ /cm ³)	0.0
K_s (cm/h)	1.86
η	21.19
m	0.066
n	2.14133
ψ_d (cm)	-15.0

En la figura 7 se muestra una evolución típica del tirante en la cabecera de la melga durante un evento de riego, los valores de tirante de dicha gráfica, debidamente interpolados, son utilizados como condición de frontera durante el riego para la solución de la ecuación de Richards en dos dimensiones.

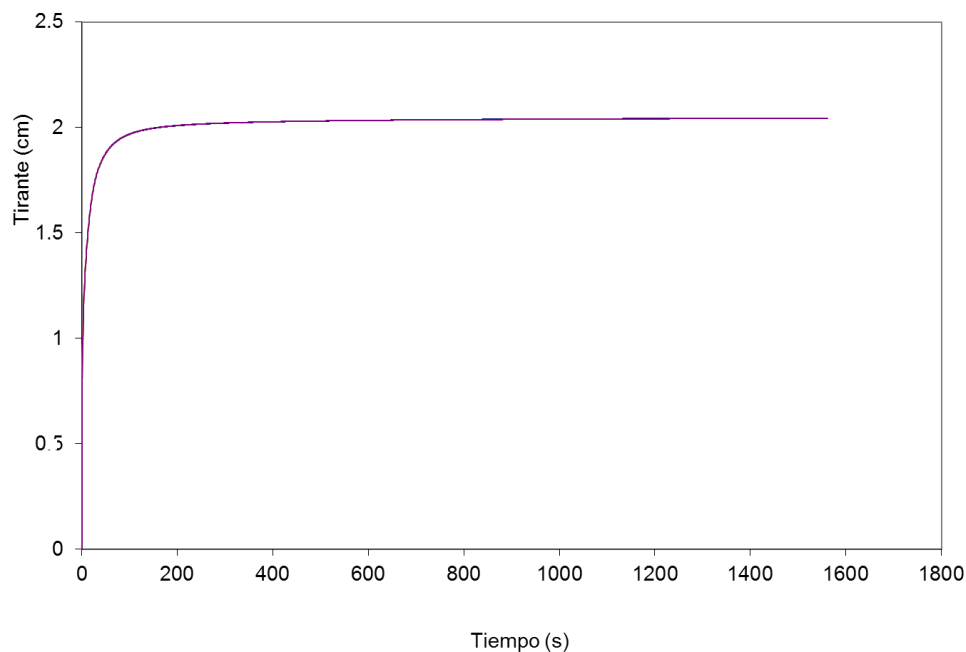


Figura 7. Evolución típica del tirante en la cabecera de una melga durante un riego

En la siguiente figura se muestra el resultado del comportamiento del nivel freático, con una profundidad inicial de 100 cm.

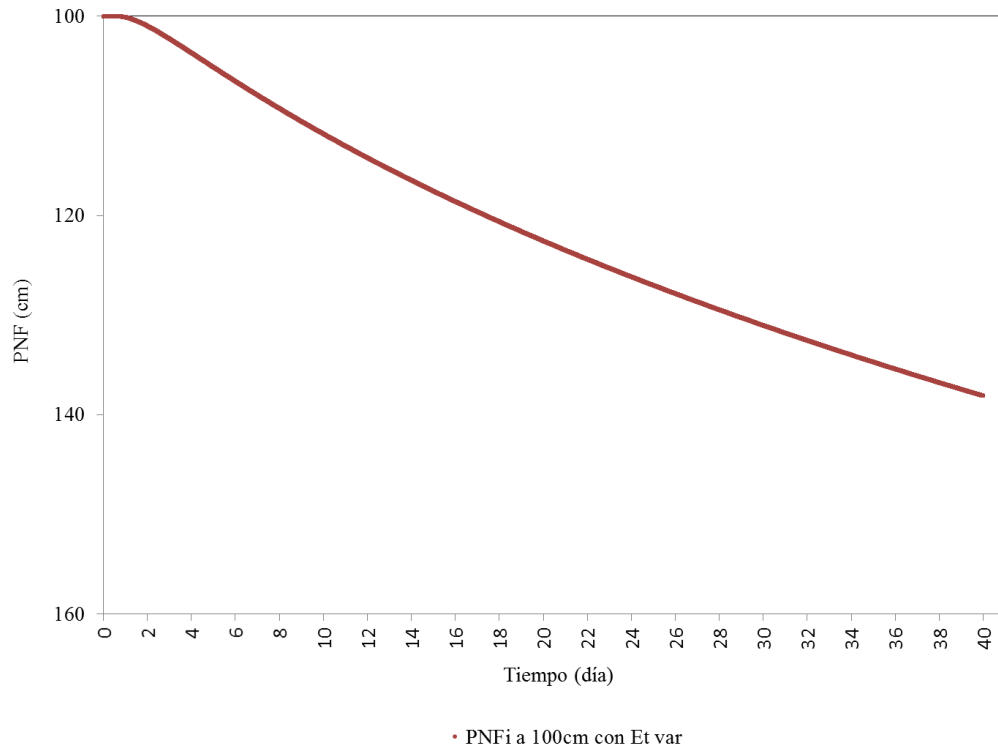


Figura 8. Comportamiento de la profundidad del nivel freático

En la figura 9, se presenta la cantidad de agua que la planta consume para su evapotranspiración en función del tiempo.

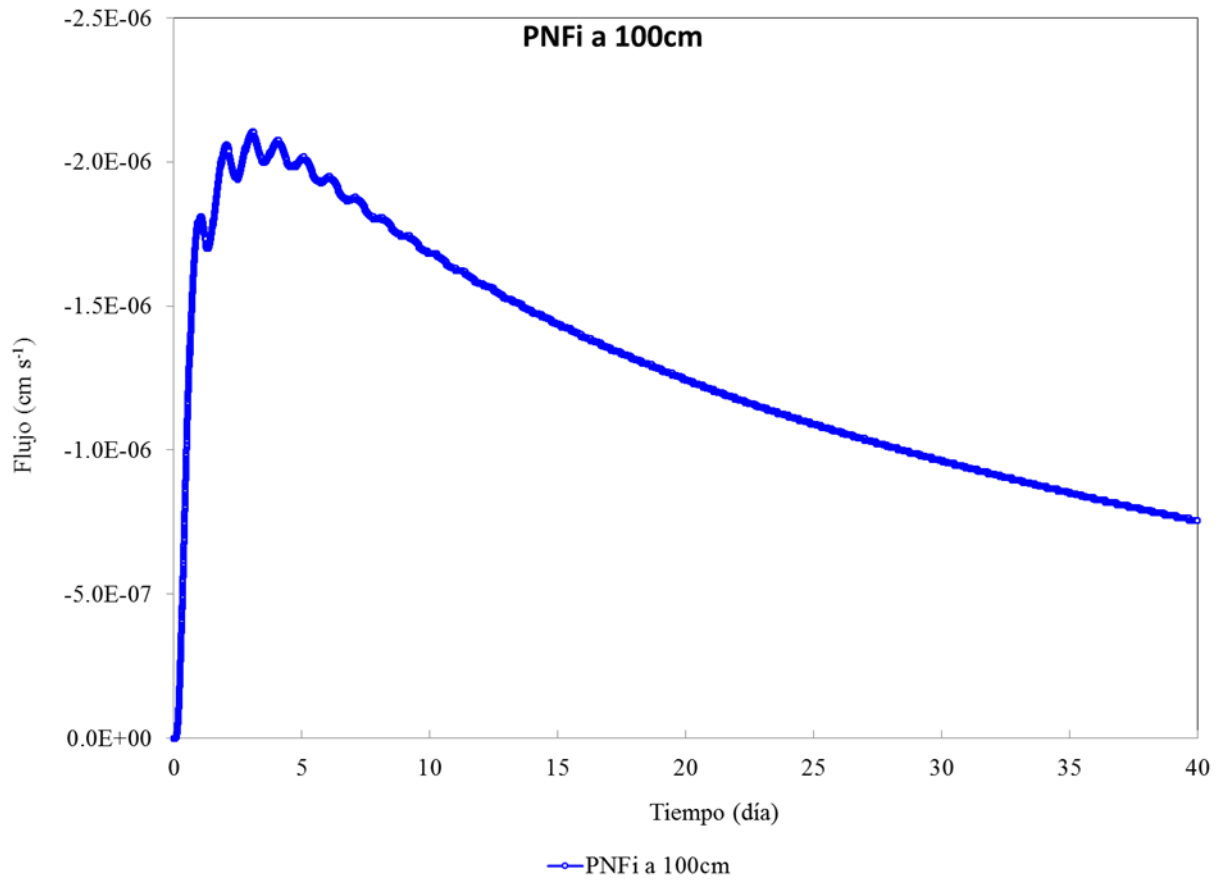


Figura 9. Flujo promedio del agua en la posición de la zona de las raíces

7. Conclusiones

En parcelas con presencia de un manto freático somero, el agua que asciende puede provocar la disminución de la zona de aireación de las raíces, restringiendo su crecimiento, lo que provoca una reducción en los rendimientos de los cultivos. Lo anterior muestra la importancia de diseñar un sistema de drenaje tomando en cuenta el aporte de agua del acuífero, a la zona radicular de los cultivos. En el diseño de los sistemas de drenaje agrícola, se debe conocer la profundidad óptima de los drenes, dentro de rangos prácticos de aplicación, de forma tal que el sistema de drenaje ayude a desalojar el exceso de humedad de las raíces y al mismo tiempo permita que exista contribución de agua desde el acuífero. En cuanto al diseño de los sistemas de riego, tradicionalmente los calendarios de riego, basados en la disminución de humedad en el suelo para prevenir o minimizar el estrés hídrico de las plantas, no consideran el aporte de agua que asciende desde el manto freático, el cual puede suplir un porcentaje de la evapotranspiración. Al no considerar este ascenso de agua hacia las raíces en los cálculos de las láminas y frecuencias de riego, se desperdician cantidades importantes de agua en las aplicaciones de los riegos.

Para conocer las condiciones de aplicabilidad de riego y drenaje que establezcan un nivel óptimo de humedad en el suelo, es necesaria una herramienta computacional, que proporcione mediante una modelación del régimen de humedad del suelo, los elementos básicos de diseño combinado de sistemas de riego y drenaje. A pesar de la elaboración de sofisticados modelos matemáticos y grandes avances en la capacidad de las computadoras, se han desarrollado muy pocos modelos para diseñar sistemas de riego y drenaje como una parte de un manejo integral del agua en el suelo

Las interacciones fuertes y complejas entre los componentes de riego y drenaje, como la influencia de las variaciones en la precipitación y la evaporación de la demanda de la atmósfera, puede ser mejor descrito por el uso de modelos de simulación numérica, que pueden describir adecuadamente las necesidades de riego y drenaje. Estos modelos serán de gran utilidad para evaluar el impacto de los diseños alternativos de drenaje y los regímenes de riego. En climas templados húmedos la evaluación debe centrarse en cómo las condiciones de humedad del suelo influyen en la duración de la labranza, la germinación y emergencia, el desarrollo del cultivo, el crecimiento y la, y la trabajabilidad del suelo.

8. Bibliografía

Ayars, J. E., Christen, E. W., Soppe, R. W., & Meyer, W. S. (2006). The resource potential of in-situ shallow ground water use in irrigated agriculture: a review. *Irrigation Science*, 24(3), 147-160.

ILRI. (1974). Principios y aplicaciones de drenaje. Vol. I. Materiales preliminares. Wageningen, Holanda

Lázaro, Ch., Saucedo, R., Namuche, V. y Fragoza, F. (2011). Proyecto: Incremento de la producción agrícola mediante el control del régimen de humedad del suelo. Informe Final. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*, 1(5), 318-333.

Wesseling, J. G., & Feddes, R. A. (2006). Assessing crop water productivity from field to regional scale. *Agricultural Water Management*, 86(1), 30-39.